



Universidade Nova de Lisboa
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Física

A Experiência de Joule Revisitada

Paula Portugal Alves

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de mestre em Física Laboratorial, Ensino e História da Física.

Orientador: Prof. Doutor Orlando Teodoro

Lisboa

2008

Aos meus pais por me inculcarem o gosto de aprender.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Orlando Teodoro, pelo apoio prestado durante a fase experimental deste trabalho, pelo incentivo e pelas sugestões.

À minha escola, Escola Secundária Dr. José Afonso, pelas facilidades concedidas em termos de horários que me permitiram a frequência deste mestrado.

Ao Sr. Mesquita pela total disponibilidade e boa disposição.

Ao Bruno Rosa e em especial ao Luís Albino pelas sugestões e apoio constante no Laboratório de Projecto desta Faculdade.

Às minhas colegas de “aventura”, Isabel Lourenço e Teresa Rodrigues, pelo encorajamento nas épocas mais difíceis.

À minha família, pelo apoio nos momentos de desânimo e pela paciência demonstrada face aos meus maus humores.

E em especial, à minha filha Beatriz, por compreender que a mãe, além de professora, é aluna e que por isso tem menos tempo para brincar “às Pollys”.

Resumo

O presente trabalho pretende ser um contributo para o ensino experimental da Física tendo como tema de fundo a *Energia*.

A histórica Experiência de Joule que demonstrou a equivalência entre trabalho e calor é o ponto de partida para a construção de alguns equipamentos científicos que permitem demonstrar esta equivalência e a conversão de energia nas suas várias formas. A Experiência de Joule é transcrita dos documentos da época e explorada à luz dos conhecimentos actuais.

Descreve-se o funcionamento de aparelhos capazes de gerar energia eléctrica a partir de movimento ou de diferença de temperatura, dínamos e células de Peltier, respectivamente.

No último capítulo, constituindo o coração deste trabalho, são descritos equipamentos científicos construídos em laboratório. Cada equipamento está devidamente enquadrado em termos curriculares, no ensino básico e/ou secundário. Apresenta-se o princípio subjacente ao seu funcionamento bem como sugestões didácticas da sua aplicação e respectivos objectivos específicos.

Todos os equipamentos foram testados em laboratório e os resultados recolhidos são apresentados e tratados quantitativamente quando se justifique.

A descrição exhaustiva (em Apêndice) das várias etapas de construção de alguns equipamentos permite a sua concretização por professores e alunos. Os materiais utilizados são fáceis de adquirir e de custo acessível à grande maioria das Escolas.

Abstract

This work is intended as a contribution to the teaching of experimental physics with the theme of the Energy as background.

The historical Joule's experiment — the demonstration of work and heat equivalence, is the starting point for the construction of scientific equipments able to demonstrate this equivalence as well as the conversion of energy in its various forms. The Joule's Experiment is described from documents of the time and explained in the light of present knowledge.

Then, it is described the operation of equipment capable of generating electricity from movement or temperature difference, dynamos and Peltier modules, respectively. In the last chapter, the heart of this work, are described scientific equipment built in the laboratory.

The use of every equipment is properly framed in terms of basic and/or secondary education curricula. The specific objectives intended to be achieved and the underlying operation principles are described. Furthermore, some teaching recommendations are presented .

The equipments were tested in laboratory and the acquired results are presented and quantitatively processed when necessary.

A detailed description (in Appendix) of the various stages of equipment construction allows its implementation by teachers and students. The materials used are easy to acquire and affordable to the vast majority of schools.

Índice Geral

Agradecimentos.....	3
Resumo	4
Abstract	5
Índice de Figuras	9
Lista de Símbolos	9
Lista de Acrónimos.....	13
1 Introdução.....	14
2 A Experiência de Joule e o Equivalente Joule-Caloria	16
2.1 A evolução do conceito de calor	16
2.2 Breve biografia de Joule	17
2.3 A Experiência de Joule	18
2.4 Reprodução da Experiência de Joule.....	21
3 Manifestações de Energia	23
3.1 Formas e transformações de energia	23
3.2 Termoelectricidade.....	24
Efeitos termoeléctricos.....	24
Materiais termoeléctricos	26
Conversores termoeléctricos.....	26
Performance e eficiência em conversores termoeléctricos	31
3.3 Máquinas eléctricas.....	33
Classificação das máquinas eléctricas	33
Transformação de energia mecânica em energia eléctrica - gerador	34

Transformação de energia eléctrica em energia mecânica – motores	36
Rendimento de uma máquina eléctrica	37
4 Materiais Didácticos	39
4.1 Enquadramento curricular	40
4.2 Equipamentos didácticos	43
4.2.1 Balanços energéticos em sistemas termodinâmicos.....	43
Tubo de cartão com esferas	43
4.2.2 Transformações de energia	50
Conversor de energia com dínamo.....	50
Plataforma Elevatória	58
4.2.3 Dispositivos termoeléctricos	64
Carrinho a água quente	64
Kit termoeléctrico.....	67
5 Conclusões.....	73
6 Referências	75
7 Bibliografia	76
8 Apêndices	78
Apêndice 1- Instruções de construção dos kits	78
Apêndice 2 – Estudo do rendimento de um motor com caixa redutora	87
Apêndice 3- Estudo da plataforma	89
Apêndice 4 – Estudo do Kit Termoeléctrico – Rendimento no aquecimento.....	93
Apêndice 5 – Estudo do Kit Termoeléctrico em modo gerador.....	94
9 Anexos	95

Documentação relativa às células de Peltier	95
---	----

Índice de Figuras

Figura 2-1 James Joule	17
Figura 2-2 Equipamento para determinação do equivalente mecânico do calor - Experiência de Joule.	19
Figura 2-3 Calorímetro com roda de pás	19
Figura 3-1 Transformações de energia	24
Figura 3-2 Dois materiais diferentes, X e Y com as extremidades unidas (junções A e B) e mantidas a temperaturas diferentes (T_1 e T_2)	24
Figura 3-3 Dois materiais diferentes, X e Y, com as extremidades unidas (junções A e B) são submetidos a uma diferença de potencial.....	25
Figura 3-4 Célula de Peltier.....	26
Figura 3-5 (a) unidade básica, (b) célula de Peltier	27
Figura 3-6 a) Gerador termoelétrico, b) Refrigerador termoelétrico.....	27
Figura 3-7 Célula de Peltier no modo de refrigeração	28
Figura 3-8 Mecanismo de funcionamento de uma célula de Peltier	29
Figura 3-9 Mecanismo de funcionamento de um elemento da célula de Peltier	30
Figura 3-10 Curva de Performance de uma célula de Peltier.....	31
Figura 3-11 A eficiência como gerador depende da diferença de temperatura das junções da célula.....	32
Figura 3-12 Esquema de um gerador elementar e representação sinusoidal da tensão de saída	34
Figura 3-13 Conversão da corrente bidireccional em unidimensional num dínamo.....	35
Figura 3-14 Conversão da corrente bidireccional em unidimensional	35
Figura 3-15 Força electromagnética num condutor em condução no seio de um campo magnético, $F_m = BIL$	36
Figura 3-16 Princípio de funcionamento do motor de corrente contínua utilizando uma só espira.....	37
Figura 4-1 Tubo de cartão, esferas de chumbo e termómetro	43
Figura 4-2 Interior do tubo	44
Figura 4-3 Diagrama de energia	47
Figura 4-4 Equipamento para determinar o equivalente mecânico do calor	48
Figura 4-5 Conversor de energia com dínamo	50
Figura 4-6 Esquema eléctrico simplificado	51

Figura 4-7 Calorímetro com termómetro digital	53
Figura 4-8 Montagem destinada ao aquecimento de água	54
Figura 4-9 Plataforma com calorímetro e sensor de temperatura	58
Figura 4-10 Carrinho movido a água quente	64
Figura 4-11 Carrinho, comando e reservatório	65
Figura 4-12 Kit Termoeléctrico	67
Figura 4-13 Medição de V , I e θ em modo refrigerador	68
Figura 4-14 Temperatura em função do tempo. A azul: valores determinados experimentalmente. A preto: linearização a partir dos valores experimentais	69
Figura 4-15 Medição de V , I e θ em modo de gerador termoeléctrico	71
Figura 4-16 Potência da célula em função da diferença de temperatura entre as duas faces da célula. Dados obtidos experimentalmente	71
Figura 4-17 Conversor Termoeléctrico	72
Figura 8-1 Conversor de energia	78
Figura 8-2 Vista da caixa aberta	79
Figura 8-3 Esquemas de montagem	80
Figura 8-4 Calorímetro com resistência	81
Figura 8-5 Carrinho e comando	82
Figura 8-6 reservatório com célula e dissipador	83
Figura 8-7 Pormenor da ligação das células (a vermelho e preto) e do carrinho (a preto) ao comando	83
Figura 8-8 Caixa de madeira para o reservatório de água	84
Figura 8-9 Kit Termoeléctrico	85
Figura 8-10 Dissipador com célula	85
Figura 8-11 Módulo de Peltier com gobelé e termómetro	86
Figura 8-12 Pormenor da caixa redutora	87
Figura 8-13 O momento da força \vec{F} , em relação a O, é: $\vec{M}_O(\vec{F}) = \vec{r} \times \vec{F}$	89

Lista de Símbolos

Símbolo	Significado
ΔE	Variação de energia
ΔT	Variação de temperatura (em K)
$\Delta \theta$	Variação de temperatura (em °C)
\vec{B}	Campo magnético
C	Capacidade térmica mássica
C	Capacidade do condensador
E	Energia
E_{cf}	Energia cinética final
E_{ci}	Energia cinética inicial
E_d	Energia dissipada
E_{pf}	Energia potencial final
E_{pg}	Energia potencial gravítica
E_{pi}	Energia potencial inicial
E_u	Energia útil
\vec{F}	Força
\vec{F}_a	Força de atrito
\vec{F}_m	Força electromagnética
\vec{g}	Aceleração da gravidade
h	Altura
I	Intensidade da corrente
L	Comprimento
M, m	Massa
\vec{M}_O	Momento de uma força em relação a O
P	Potência
Q	Calor

R	Radiação
R	Resistência eléctrica
\vec{r}	Posição (vector)
T	Temperatura (em K)
V	Tensão
v	Velocidade linear
V_{ind}	Tensão induzida
W	Trabalho
α	Coeficiente de Seebeck
β	Coeficiente de Thomson
ε_r	Erro relativo
η	Rendimento
θ	Temperatura (em °C)
Π	Coeficiente de Peltier

Lista de Acrónimos

SI	Sistema Internacional de Unidades
PVC	Policloreto de vinilo
LED	Díodo emissor de Luz (Light Emitting Diode)
AC	Corrente Alternada (Alternating current)
DC	Corrente Contínua (Direct Current)
C.O.P.	Coeficiente de Performance (Coefficient of Performance)

1 Introdução

Para a maior parte das pessoas energia é um conceito muito vago e sujeito a várias interpretações erradas. É confundido com força, electricidade e até velocidade. Os professores do 3º ciclo do ensino básico confrontam-se, no 7º ano, com estes conceitos alternativos que os alunos interiorizam provenientes da linguagem que utilizamos no dia-a-dia.

As Orientações Curriculares do 3º ciclo do ensino básico para a disciplina de Ciências Físico-Químicas ([6]) propõem algumas experiências educativas que despistam estes conhecimentos prévios com vista a uma posterior clarificação.

O conceito de energia está implícito na maioria dos conteúdos leccionados em Física e Química, no entanto, é no 7º e no 10º ano que este tema é mais aprofundado.

No 7º ano é feita uma primeira abordagem do tema conferindo-lhe um carácter estruturante e unificador. Identificam-se fontes de energia utilizadas na nossa vida explorando os vários recursos energéticos e sensibilizando, os alunos, para a problemática energética. Referem-se situações do quotidiano em que ocorrem transferências e transformações de energia. Analisam-se montagens experimentais que permitem o reconhecimento que a energia se transfere e transforma (montagem de circuitos eléctricos, modelos de centrais produtoras de energia) e situações em que há perda de energia sob a forma de calor interpretando-se os significados físicos de conservação e dissipação de energia.

No 10º ano pretende-se a compreensão de fenómenos naturais com base na 1ª e 2ª Lei da Termodinâmica e a constatação que a energia se conserva em sistemas isolados. Pretende-se, também, que o aluno conheça a evolução do conceito de energia e as experiências históricas fundamentais para a clarificação deste conceito – Experiências de Thompson e de Joule.

De salientar a forte aposta, bem patente nas Orientações Metodológicas ([6] e [7]), no ensino experimental das ciências quer ao nível do ensino básico quer ao nível do ensino secundário.

É impensável, nos dias de hoje, ensinar Física apenas com giz e quadro. Exige-se do professor, em qualquer domínio do conhecimento, aulas dinâmicas e criativas que despertem o interesse dos educandos. Embora o ensino expositivo não deva ser excluído do processo de ensino-aprendizagem este terá de ser complementado com um ensino de carácter prático-experimental. Assim, reveste-se de grande importância a inclusão de actividades experimentais que permitem ao aluno desenvolver capacidades de observação, recolha de dados, resolução de problemas, manipulação de variáveis e, não menos importante, permitem-lhe desenvolver habilidades manipulativas.

Por outro lado, conhecendo a nossa realidade escolar, reconhece-se algumas limitações a este tipo de ensino: escolas mal equipadas, docentes maioritariamente com formação em Química, escassa oferta de formação e alguma resistência à mudança das práticas docentes.

Foi a partir da necessidade de contextualizar historicamente conceitos como energia, calor e trabalho e de, em simultâneo, contribuir para o desenvolvimento do ensino experimental da Física que surgiu o tema desta dissertação. Pretende-se demonstrar que é acessível a todos os docentes, a construção e utilização de equipamentos científicos que tornem mais motivantes e enriquecedoras as aulas de Física. Houve a preocupação de utilizar materiais de baixo custo, acessíveis a qualquer Escola, e processos de construção simples.

É, assim, duplo o objectivo deste trabalho:

- Contribuir para um melhor apetrechamento das escolas no que diz respeito ao ensino experimental da Física;
- Estimular a participação efectiva dos alunos no processo ensino-aprendizagem.

No séc. XIX Joule demonstrou pela primeira vez a equivalência entre o trabalho mecânico e o calor ao conseguir aquecer água através do movimento mecânico produzido pela queda de um corpo. Revisita-se a Experiência de Joule utilizando equipamentos didácticos simples que permitem demonstrar a equivalência entre trabalho e calor e também a equivalência entre as várias formas de energia.

Depois de um breve resumo da evolução histórica do conceito de calor procede-se à descrição e análise, à luz dos conhecimentos actuais, da Experiência de Joule.

No terceiro capítulo relembram-se algumas noções fundamentais para a compreensão das experiências apresentadas, nomeadamente sobre máquinas eléctricas e termoelectricidade.

Por fim apresentam-se os equipamentos didácticos construídos e a sua aplicação em contexto de sala de aula. É feito um tratamento quantitativo dos resultados de algumas das experiências explorando os conceitos de rendimento e conservação de energia.

Em Apêndice encontram-se instruções de construção detalhadas e listas de preços/locais de aquisição dos materiais necessários.

2 A Experiência de Joule e o Equivalente Joule-Caloria

2.1 A evolução do conceito de calor

Historicamente, foi longo o caminho percorrido na busca de uma definição clara do conceito de calor.

Frequentemente, e ainda hoje no senso comum, calor e temperatura são duas grandezas que dificilmente se distinguem.

A noção de que um sistema pode variar a sua energia trocando trabalho e/ou calor é um dado recente na história da Ciência. Trabalho e Calor eram grandezas com unidades diferentes. A caloria, unidade histórica de calor, definia-se como a quantidade de calor necessária para elevar em 1°C a temperatura de um grama de água à temperatura inicial de 14,5°C.

A primeira teoria explicativa da libertação de calor durante uma combustão surge na segunda metade do século XVII - Teoria do Flogisto. Segundo esta teoria, proposta por Georg Stahl (1660-1734) químico e médico alemão, os corpos combustíveis teriam como constituinte um elemento - o flogisto - que, no momento da combustão, abandonaria o corpo, alterando as suas características.

Uma das limitações desta teoria era o facto de não explicar o aumento de massa observado na combustão de um metal; se este perde flogisto a sua massa deveria diminuir.

Esta teoria vigorou até 1777, ano em que Antoine Laurent Lavoisier (1734-1794), químico francês por alguns considerado como o pai da química moderna, a derrubou definitivamente explicando a combustão como uma simples reacção química com o oxigénio.

No seu trabalho *Traité Élémentaire de Chimie*, 1789, Lavoisier enumerou vinte e três dos elementos conhecidos actualmente e incluiu nessa classificação a luz e o calórico. Este último estaria incorporado na matéria. Assim o gás oxigénio seria constituído por oxigénio e calórico. Numa combustão o oxigénio era incorporado pelo combustível e o calórico libertado.

Segundo a Teoria do Calórico, um corpo a alta temperatura conteria muito calórico, ao passo que outro a temperatura inferior conteria menos calórico. Quando dois objectos nessas condições, eram colocados em contacto, o mais rico em calórico transferiria uma parte dele para o outro. Esta transferência obedecia a uma lei de conservação - a quantidade de calórico cedida pelo corpo quente era igual à absorvida pelo corpo frio.

Esta teoria era capaz de explicar diversos fenómenos físicos, como por exemplo, a condução do calor, contudo a ideia de que o calor era uma substância e como tal teria peso, não resistiu às evidências em contrário que começaram a surgir no fim do século XVIII. O próprio Lavoisier registou que um corpo aquecido não pesava mais do que quando estava frio pelo que era impossível associar peso ao calórico.

Em 1798, Benjamin Thompson (1753-1814), Conde Rumford, físico norte-americano exilado em Inglaterra, observou que ao brocar os metais para fabricar peças de artilharia, estes aqueciam de tal forma que era necessário mergulhá-los em água fria que rapidamente passava à fervura. O aquecimento era produzido pela broca, o que significava que o calor poderia ser produzido por fricção e não por fornecimento de calórico. Conclui, após a realização de variadas experiências, que o calórico não existia e que o calor era devido ao movimento das partículas dos corpos.

No entanto a Teoria do Calórico manteve-se como a mais popular pois explicava, de uma forma simples, fenómenos como a condução e a conservação do calor e permitia a existência de uma ciência quantitativa do calor recorrendo ao termómetro.

Julius Robert Mayer (1814-1878), médico e físico alemão, foi o primeiro a atribuir ao calor a designação de energia e a estabelecer, baseado em considerações teóricas, o equivalente mecânico do calor (1842). Propôs, ainda, que as diferentes formas de energia *"são quantitativamente indestrutíveis e qualitativamente convertíveis."* As suas descobertas foram, no entanto, menosprezados pela comunidade científica e só alguns anos mais tarde, devido à comprovação experimental efectuada por James Joule, lhe foi reconhecido o mérito e vários dos seus estudos foram publicados. Para alguns historiadores Mayer foi o mais injustiçado dos físicos pois tendo sido ele o primeiro a formular a Lei da Conservação da energia e a publicar resultados sobre o equivalente mecânico do calor foi Joule que teve o seu nome imortalizado como unidade de energia do SI.

Em 1843 a Teoria do Calórico estava definitivamente afastada.

2.2 Breve biografia de Joule

James Prescott Joule nasceu a 24 de Dezembro de 1818 em Salford, perto de Manchester. O início da sua educação escolar foi realizada em casa. Aos 16 anos foi enviado, com o seu irmão, para Manchester onde foi aluno de John Dalton. Desde novo que gostava de pesquisas e experiências envolvendo cálculos e medidas.

Foi fabricante de cerveja, actividade familiar, realizando as suas experiências científicas nas horas que lhe sobravam. Em 1838 transformou uma das divisões da casa do pai num laboratório e iniciou as suas investigações.

Nesse mesmo ano publicou o seu primeiro trabalho mas só em 1840 se fez notar com a apresentação, à Royal Society, de uma importante descoberta - a relação



Figura 2-1 James Joule

(http://www.malaspina.com/site/person_696.asp)

matemática para cálculo do calor que é produzido pela passagem da corrente eléctrica num condutor.

Durante os dez anos seguintes dedicou-se ao aperfeiçoamento de métodos experimentais que lhe permitissem a determinação do equivalente mecânico do calor com uma crescente precisão. O valor, por ele, determinado e o famoso *Paddle-wheel Experiment*¹ foi publicado, no jornal "*Philosophical Transaction*", em 1850.

Ainda nesse ano foi eleito membro da Royal Society sendo reconhecido como um importante cientista.

Morreu em 11 de Outubro de 1889, em Sale.

Em sua honra, foi atribuído o seu nome, Joule, à unidade de energia.

2.3 A Experiência de Joule

Em 1845, Joule enviou uma carta ao editor da revista *Philosophical Magazine* em que descrevia a sua experiência e divulgava os valores obtidos para a equivalência entre trabalho e calor.

“A roda movia-se com grande resistência na cuba de água pelo que os pesos (cada um de 4lbs²) caíam a uma velocidade muito pequena – 1 pé por segundo³. Estes pesos encontravam – se a uma altura de 12 jardas⁴ e, conseqüentemente quando os pesos atingiam o solo era necessário içá-los novamente de forma a manter o movimento da roda. Depois desta operação ser repetida 16 vezes o aumento de temperatura da água era registado por um termómetro bastante sensível. Com vista a eliminar os efeitos de aquecimento ou arrefecimento provenientes da atmosfera esta experiência foi repetida 9 vezes. [...] Posso, então, concluir que a existência de uma relação de equivalência entre o calor e as formas comuns de energia está demonstrada; e assumir 817 lbs, média das três classes de experiências, como equivalente, até que experiências mais precisas sejam feitas.” [1]

¹ Experiência de Joule: equipamento experimental descrito em 2.3 A Experiência de Joule.

² 1 libra = 0,4536 kg

³ 1 pé = 30,48 cm; $v = 0,3048 \text{ m s}^{-1}$

⁴ 1 jarda = 0,91440 m

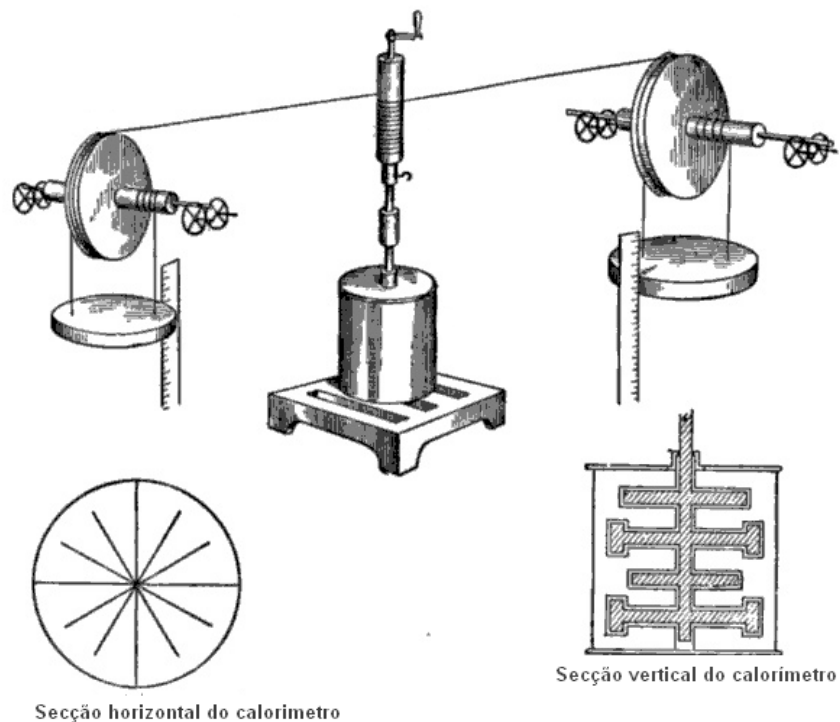


Figura 2-2 Equipamento para determinação do equivalente mecânico do calor - Experiência de Joule.

(adaptado de www.wikipedia.com)

Em 1850, Joule apresentou aos membros da Royal Society uma nova monografia onde revia todo o seu anterior trabalho, descrevia pormenorizadamente o equipamento utilizado e apresentava o registo de todas as medidas efectuadas bem como a sua análise estatística.

O equipamento experimental, Figura 2-2, desenvolvido por Joule consistia numa roda de pás colocada horizontalmente numa cuba que continha água. Esta roda era colocada em movimento através de um molinete ao qual se ligavam duas massas. A queda das massas arrastava então as pás, por meio do molinete, e a fricção gerada pelo movimento das pás na água aquecia-a.

A cuba (calorímetro) era um vaso cilíndrico de cobre contendo no seu interior 4 placas verticais fixas em intervalos de 90° e um agitador de latão com 8 pás presas a um eixo vertical (roda de pás) isolado por um revestimento de madeira capaz de minimizar as perdas de calor por condução. As massas, de 29 lbs ou 10 lbs, eram



Figura 2-3 Calorímetro com roda de pás

(www.answers.com)

suspensas por cordas num eixo ligado a uma roldana. As roldanas ao moverem-se faziam girar o eixo vertical da roda de pás. Depois de caírem de uma altura de cerca de 5 pés, eram recolocadas no eixo e caíam novamente. Este processo era repetido vinte vezes.

Entre o equipamento e o experimentador existia uma placa de madeira de forma a anular o calor irradiado pelo experimentador.

A temperatura do laboratório era registada antes, durante e depois da experiência. Desta forma, Joule determinava se o aumento de temperatura do banho teria como causa apenas a fricção ou também a radiação proveniente da atmosfera envolvente.

O termómetro utilizado era bastante sensível detectando diferenças de $1/100$ °F⁵. A precisão das temperaturas registadas é duvidosa tendo em atenção as condições em que a experiência foi realizada.

A fim de determinar com precisão a quantidade de calor envolvida na experiência, Joule determinou o calor específico do cobre e do latão da roda de pás.

Relatou, ainda, uma série de experiências semelhantes às efectuadas anteriormente mas para as quais utilizou jogos diferentes de palhetas para a roda de pás: um de latão, um de ferro forjado e um último de uma liga de ferro e carbono. Os dois últimos jogos foram mergulhados também em mercúrio. Joule demonstrou, assim, que a relação entre trabalho e calor não dependia dos materiais nem dos processos utilizados.

“Eu concluo, tendo em conta os resultados experimentais relatados neste documento,

1º que a quantidade de calor produzida pela fricção dos corpos, no estado sólido ou líquido, é sempre proporcional à quantidade de força dispendida,

2º que a quantidade de calor capaz de aumentar, em 1ºF, a temperatura de 1 libra de água(pesada em vácuo entre 50°C e 60°C)é equivalente à energia produzida por uma força mecânica responsável pela queda de 772 lbs de uma altura de 1 pé..” [1]

Actualmente o valor aceite é 778 lbs-pé o que atesta o extremo rigor das experiências de Joule.

Analisando esta experiência à luz dos conhecimentos actuais a energia transferida para a água provém da energia potencial gravítica inicial das massas:

$$E_{ci} + E_{pi} = E_{cf} + E_{pf} + E_{transferida}$$

Visto que a energia cinética inicial e a energia potencial gravítica final são nulas e que a energia cinética final é desprezável, $E_{pi} = E_{transferida}$

⁵ O Grau Fahrenheit é uma escala de temperatura proposta por Gabriel Fahrenheit em 1724. Uma diferença de 1,8 °F equivale à de 1°C. $1/100$ °F equivale aproximadamente a 0,0055 °C.

$$E_{transferida} = M g h$$

sendo M a massa dos corpos em queda e h a altura da qual caiem.

A quantidade de calor transferida para a água de forma a elevar a sua temperatura é dada por:

$$Q = m c \Delta \theta$$

em que m é a massa da água, c a sua capacidade térmica mássica⁶ e $\Delta \theta$ a variação da sua temperatura.

Desprezando perdas de energia por condução, convecção e radiação,

$$Mgh = m c \Delta \theta$$

Desta expressão pode-se determinar c em $\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Como a capacidade térmica mássica da água, por definição é $1 \text{ cal g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ obtêm-se a equivalência entre o calor e o trabalho (equivalente mecânico do calor).

O valor encontrado por Joule, 772 lbs-pé, corresponde a um factor de conversão $1 \text{ cal} = 4,150 \text{ J}$ ⁷ o que representa um erro inferior a 1% (0,72%) relativamente ao valor actualmente aceite, $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$.

2.4 Reprodução da Experiência de Joule

A reprodução da Experiência de Joule em sala de aula é extremamente difícil atendendo às rigorosas condicionantes experimentais. A estrutura do calorímetro é complexa e todo o equipamento ocupa um grande espaço visto que para se obter uma variação de temperatura mensurável a altura de queda das massas tem de ser, no mínimo, cerca de 11 m e a queda tem de ser repetida várias vezes.

O termómetro a utilizar tem de ter uma grande sensibilidade pois a variação de temperatura sofrida é pequena, Joule declarou ter utilizado um termómetro com uma sensibilidade de $1/100 \text{ } ^\circ\text{F}$ o que equivale aproximadamente a $0,0055 \text{ } ^\circ\text{C}$.

A temperatura do local tem de ser monitorizada antes e durante a experiência para que se possa garantir que a variação de temperatura da água não tem origem numa causa externa. O próprio

⁶ Capacidade térmica mássica ou Calor específico. Esta última designação é, no entanto, desaconselhada pelas normas internacionais.

⁷ $Mgh = 772 \text{ lbs-pé} = 772 \times 0,4536 \times 9,8 \times 0,3048 = 1046 \text{ J}$

$$c = \frac{Mgh}{m\Delta\theta} \quad c = \frac{1046}{0,4536 \times \left(\frac{1}{1,8}\right)} \quad c = 4150 \text{ J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad \text{donde } 1 \text{ cal} = 4,150 \text{ J}$$

experimentador deverá estar isolado para que o calor irradiado por si não afecte o resultado. A experiência deve ser repetida várias vezes para que os resultados sejam fiáveis.

Ora, não é possível recriar este ambiente em laboratório escolar com um tempo limitado de 135 minutos.

Dado que esta experiência é de grande interesse didáctico - demonstra a conversão de energia nas suas várias formas e estabelece a relação entre trabalho e calor - e se enquadra nos programas do ensino básico e secundário procuraram-se alternativas que tenham em conta as condicionantes do meio escolar. Existem, no mercado de material didáctico, alguns Kits de montagem simples que satisfazem os objectivos da Experiência de Joule.

É também possível a realização, em sala de aula, de experiências muito simples com material de uso comum que demonstrem qualitativamente esta equivalência: aquecer uma porção de água com uma varinha mágica ou aquecer pequenas esferas de chumbo através da sua queda de uma certa altura.

Outra alternativa à Experiência de Joule é o aquecimento de água através do trabalho eléctrico proveniente de uma transformação de energia mecânica (uma massa em queda, rodar um volante, etc) em energia eléctrica.

Neste trabalho exploram-se algumas dessas alternativas.

3 Manifestações de Energia

3.1 Formas e transformações de energia

A energia manifesta-se de várias formas estando associada a todos os objectos e a todas as actividades. Assim, os alimentos dão-nos energia, uma lâmpada acesa fornece energia sob a forma de luz e calor, um jogador de futebol transfere energia para a bola, a água aprisionada numa albufeira fornece energia que depois de transformada chega às nossas casas sob a forma de electricidade. Nada acontece sem energia.

Por uma questão de comodidade a energia é qualificada de diferentes modos, consoante os efeitos que produz e as fontes de onde provém. Independentemente da sua qualificação, a energia total de um corpo, é a soma da sua energia cinética e energia potencial.

A energia cinética é aquela que se está a manifestar e está associada ao movimento. Por exemplo, um automóvel em andamento possui energia cinética. O seu valor depende da velocidade e da massa do corpo.

A energia potencial é uma energia armazenada nos corpos e deve-se à interacção entre estes. Esta energia é nomeada de diferentes formas consoante a sua origem. Salientam-se as mais importantes:

- energia potencial gravítica, quando nos referimos à energia associada à posição de uma massa em relação a outra (ex: um vaso no parapeito de uma janela);
- energia potencial química resultante das ligações químicas entre átomos, armazenada em alimentos, combustíveis, etc (ex: um iogurte);
- energia potencial elástica associada à deformação dos corpos (ex: uma mola comprimida)
- energia potencial eléctrica devido à interacção entre cargas eléctricas(ex: atracção electrostática de um pente a pequenos pedaços de papel).

A energia cinética pode converter-se em energia potencial e vice-versa.

Relativamente à classificação da energia de acordo com os seus efeitos visíveis destacam-se, de acordo com o âmbito deste trabalho, a energia eléctrica, energia radiante e energia térmica. Estas formas de energia podem transformar-se umas nas outras recorrendo a dispositivos como lâmpadas, motores, dínamos, células de Peltier, etc.

Neste capítulo descreve-se o funcionamento das Células de Peltier e das Máquinas Eléctricas. A célula de Peltier transforma energia térmica em eléctrica e vice-versa. A máquina eléctrica transforma energia cinética (ou mecânica) em energia eléctrica e vice-versa.

No capítulo seguinte descrevem-se algumas montagens que permitem demonstrar as transformações de energia ilustradas na Figura 3-1.

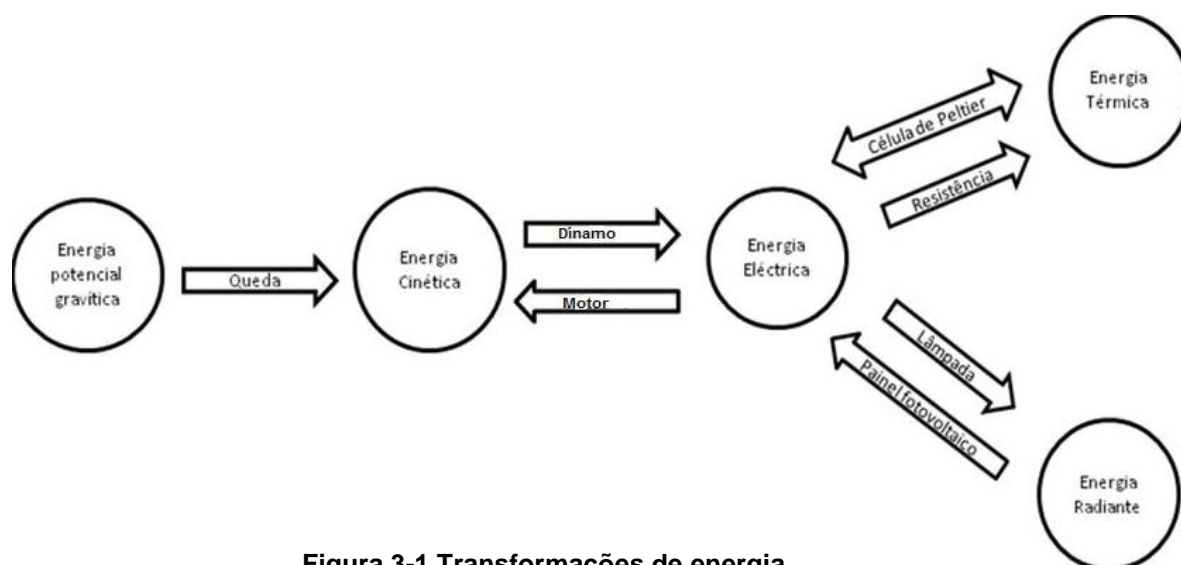


Figura 3-1 Transformações de energia

3.2 Termoelectricidade

A Termoelectricidade estuda fenómenos de transformação directa de energia térmica (gradiente de temperatura) em energia eléctrica e vice-versa. São exemplos o efeito Peltier, o efeito Seebeck, e o efeito Thomson.

Efeitos termoeléctricos

Efeito de Seebeck

O efeito de Seebeck foi descoberto, acidentalmente, em 1821 por Thomas Seebeck, no seu laboratório em Berlim, ao observar que uma agulha metálica era desviada quando colocada entre dois condutores de materiais distintos unidos num dos seus extremos e submetidos a uma diferença de temperatura.

Assim, dois condutores (ou semicondutores) distintos, X e Y , unidos nas extremidades e submetidos a uma diferença de temperatura, T_1 e T_2 produzem uma tensão (V). É neste princípio que se fundamenta o funcionamento de um termopar.

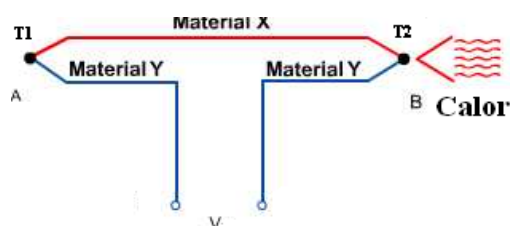


Figura 3-2 Dois materiais diferentes, X e Y com as extremidades unidas (junções A e B) e mantidas a temperaturas diferentes (T_1 e T_2)

(adaptado de www.airsinghigh.com)

O coeficiente de Seebeck é definido como sendo a tensão produzida entre dois pontos de um condutor, em circuito aberto, quando submetido a uma diferença de temperatura de 1K entre esses dois pontos.

$$V = \alpha(T_1 - T_2) \quad \text{donde} \quad \alpha = \frac{V}{\Delta T}$$

Efeito de Peltier

Uns anos mais tarde, em 1834, Jean Charles Peltier descobre um segundo efeito termoelétrico que é o inverso do primeiro: dois condutores (ou semicondutores) distintos, X e Y, unidos nas extremidades e submetidos a uma tensão em circuito fechado, produzem uma diferença de temperatura, T_1 e T_2 . Numa junção, a quente, dá -se a libertação de calor e na outra, a fria, a absorção.

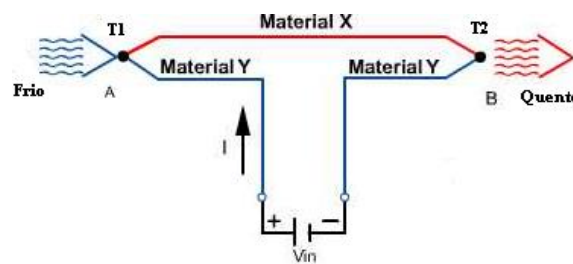


Figura 3-3 Dois materiais diferentes, X e Y, com as extremidades unidas (junções A e B) são submetidos a uma diferença de potencial

(adaptado de www.airsinghigh.com)

O coeficiente de Peltier é dado por: $\pi = \frac{I}{Q}$

onde I é a corrente que atravessa os condutores e Q é o calor absorvido/libertado nas junções.

Efeito de Thomson

William Thomson demonstra em 1851 que os efeitos de Seebeck e de Peltier estão inter-relacionados. Um material submetido a uma diferença de temperatura e percorrido por uma corrente elétrica troca calor com o meio exterior.

O coeficiente de Thomson, β , relaciona calor com corrente elétrica e diferença de temperatura:

$$\beta = \frac{Q}{I\Delta T}$$

Materiais termoelétricos

Altenkirch, por volta de 1911, estabeleceu as características ideais de um material termoelétrico: elevado coeficiente de Seebeck, alta condutividade elétrica e baixa condutividade térmica.

Uma elevada condutividade elétrica minimiza o efeito de Joule e uma baixa condutividade térmica ajuda a aprisionar o calor numa única junção e assim manter a diferença de temperatura entre as junções. No entanto um metal não possui estas três características simultaneamente pelo que o interesse focava-se num elevado coeficiente de Seebeck. Infelizmente a maioria dos metais com elevado coeficiente de Seebeck, da ordem dos 10 microvolts/K, apresentavam um rendimento, em termos de conversão termoelétrica, muito baixo.

Em 1920 desenvolvem-se semicondutores sintéticos de elevado coeficiente de Seebeck, da ordem dos 100 microvolts/K.

Abram Fedorovich Ioffe, em 1929, demonstrou que um conversor termoelétrico construído com semicondutores apresentava um rendimento energético de cerca de 4%.

Entre 1950 e 1960 vários materiais semicondutores foram investigados, concluindo-se que as ligas de bismuto-telúrio, chumbo-telúrio e silício-germânio são as mais eficientes a operar a temperaturas de 450K, 900K e 1400K respectivamente.

Conversores termoelétricos

Uma célula de Peltier é constituída por um número impar de elementos semicondutores do tipo-p e tipo-n agrupados em pares limitados por uma capa cerâmica. Os mais usuais formam conjuntos de 7-31-71-127 elementos. As placas cerâmicas possuem pistas de cobre que permitem unir os semicondutores electricamente em série e termicamente em paralelo, conforme mostra a Figura 3-5. Cada unidade tem apenas alguns milímetros de espessura, geralmente uma forma quadrada, Figura 3-4, e variados tamanhos consoante a potência pretendida.

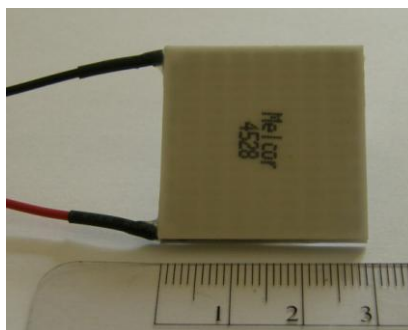


Figura 3-4 Célula de Peltier

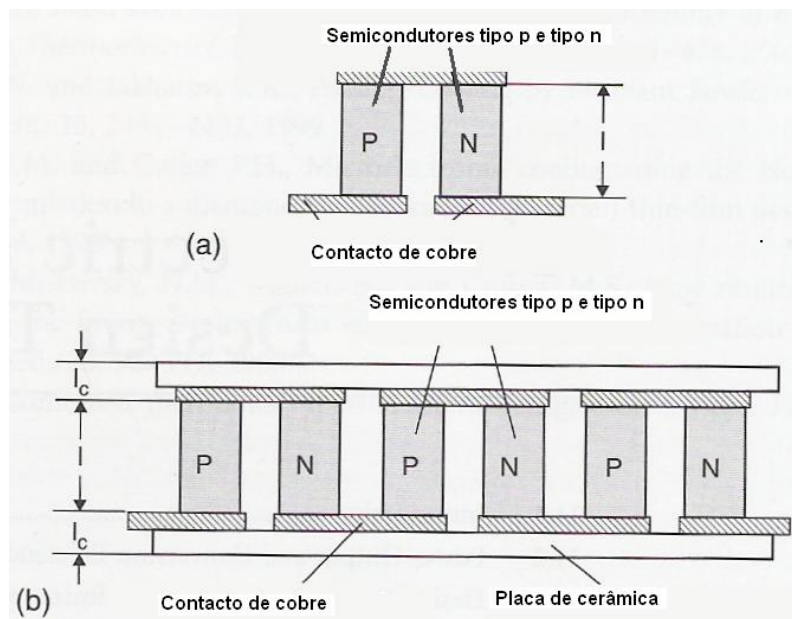


Figura 3-5 (a) unidade básica, (b) célula de Peltier

(adaptado de [2])

Para temperaturas próximas da ambiente o material mais utilizado na sua construção é Bi_2Te_3 (telureto de bismuto) ou Sb_2Te_3 (telureto de antimónio) com melhores prestações que o anterior.

Estas células podem ter duas aplicações típicas distintas:

- Refrigeração: uma corrente eléctrica é aplicada à célula. O calor é bombeado de um lado para o outro ficando uma junção fria e a outra quente.
- Produção de corrente eléctrica: é mantida uma diferença de temperatura entre as junções opostas da célula. O fluxo de calor que a atravessa é convertido em corrente eléctrica.

Estas duas aplicações estão ilustradas na Figura 3-6.

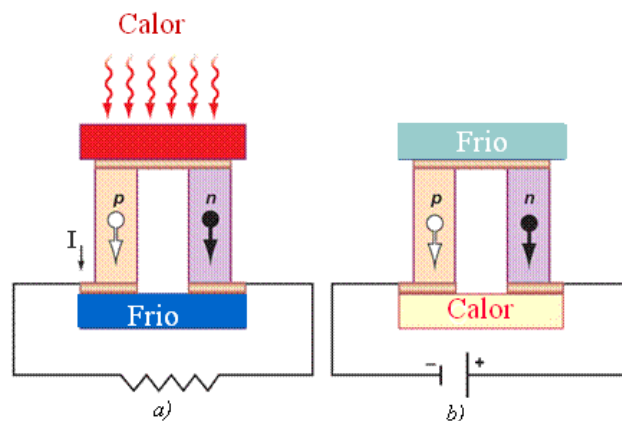


Figura 3-6 a) Gerador termoelétrico, b) Refrigerador termoelétrico

(adaptado de www.melcor.com)

Refrigeração termoelétrica

Esta forma de refrigeração, que se baseia no efeito de Peltier, apresenta algumas vantagens em relação à convencional das quais se podem destacar:

- a alternância da produção de frio ou quente bastando para tal inverter a polaridade da tensão aplicada;
- é um método silencioso e isento de vibrações;
- facilmente se varia a potência refrigerante, actuando sobre a tensão de alimentação;
- não necessita manutenção e tem uma alta durabilidade;
- não possui elementos móveis;
- o seu tamanho reduzido.

Como desvantagens assinala-se o baixo rendimento e os altos custos de produção.

Como principais aplicações destacam-se os refrigeradores portáteis, as máquinas de distribuição de alimentos e os dissipadores de calor em computadores e dispositivos electrónicos.

Neste tipo de aplicação uma corrente contínua é aplicada aos terminais da célula de Peltier provocando uma diferença de temperatura entre as duas junções.

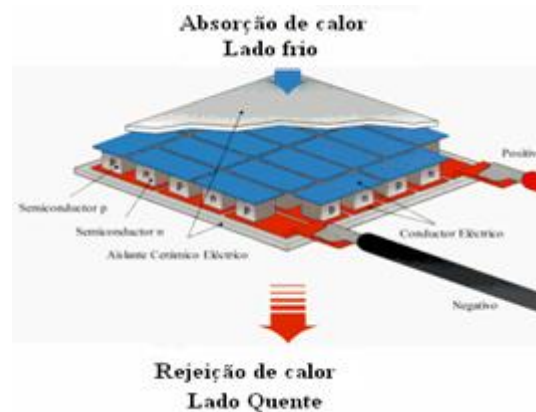


Figura 3-7 Célula de Peltier no modo de refrigeração

(adaptado de www.melcor.com)

Vejamos o que se passa num dos elementos observando a Figura 3-8

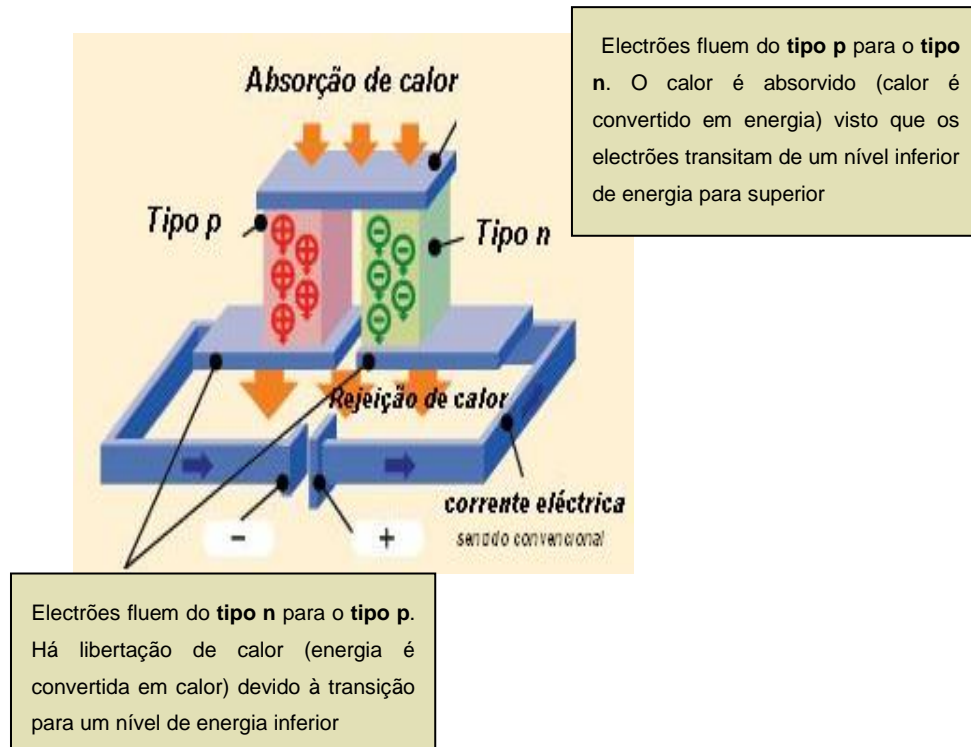


Figura 3-8 Mecanismo de funcionamento de uma célula de Peltier

(adaptado de www.komatsu-electronics.co.jp)

A tensão aplicada à célula provoca uma corrente eléctrica que flui livremente nas pistas de cobre mas não nos semicondutores. Quando um electrão transita da pista de cobre para o semicondutor tipo *p* necessita de preencher uma “lacuna” de forma a deslocar-se através do semicondutor. Ao preencher a lacuna passa para um nível mais baixo de energia e liberta calor. As lacunas movem-se da junção fria para a quente. Seguidamente quando o electrão transita do tipo *p* para a pista de cobre, na junção fria, passa para um nível de energia mais elevado absorvendo calor. Circula livremente na pista de cobre até transitar para o semicondutor de tipo *n* passando para um nível de energia mais elevado de forma a progredir pelo semicondutor, absorvendo calor. Finalmente quando o electrão transita do tipo *n* para a pista de cobre passa para um nível de energia mais baixo libertando calor. Resumindo, o calor é sempre absorvido na junção fria. Os portadores de carga (electrões - tipo *n* e lacunas - tipo *p*) deslocam-se sempre da junção fria para a quente e o calor é sempre libertado na junção quente da célula de Peltier. Ao trocar a polaridade a junção fria será a inferior e a quente a superior. A capacidade calorífica da célula é proporcional à intensidade da corrente e depende da geometria, do número de pares de elementos e do material utilizado na célula.

Gerador termoelétrico

A mesma célula de Peltier pode ser utilizada como gerador termoelétrico substituindo a fonte de alimentação DC por um receptor (resistência, motor, etc.) e sujeitando as junções a uma diferença de temperatura. Tendo por base o efeito de Seebeck, produz-se-á uma pequena diferença de potencial que gera uma corrente eléctrica no circuito, proporcional à diferença de temperatura. O mecanismo de funcionamento é ilustrado na Figura 3-9.

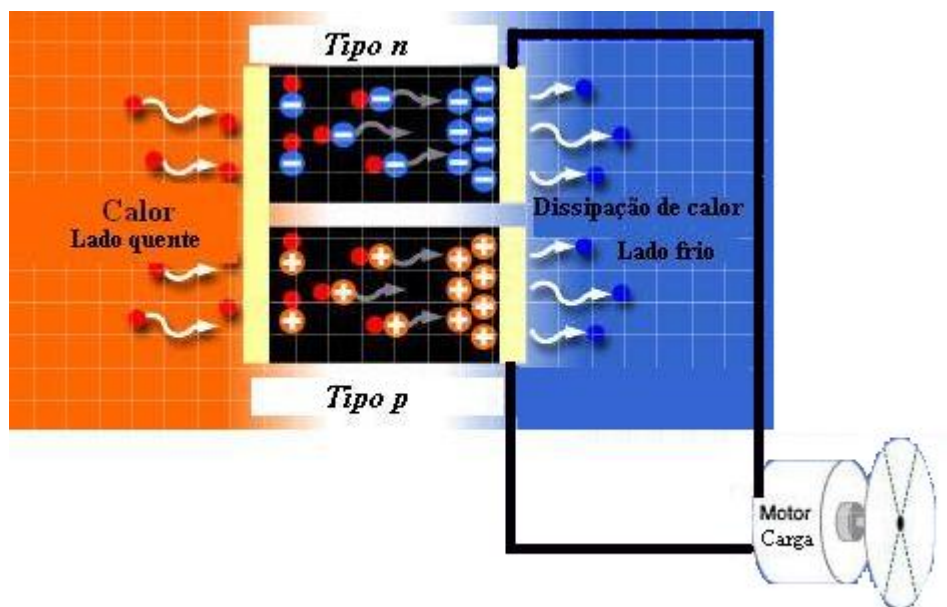


Figura 3-9 Mecanismo de funcionamento de um elemento da célula de Peltier

(adaptado de www.hizook.com)

A corrente eléctrica tem origem no movimento de portadores de carga da junção quente para a fria – no *tipo p* as “lacunas” originam um excesso de carga positiva na junção fria e no *tipo n* os electrões originam um excesso de carga negativa na mesma junção, criando-se uma diferença de potencial em cada elemento. Quando os elementos são unidos flui uma corrente eléctrica (sentido convencional) da junção fria (*tipo p*) para a junção fria (*tipo n*).

Performance e eficiência em conversores termoelectricos

Uma célula de Peltier a funcionar como refrigerador pode gerar uma diferença de temperatura entre as suas faces de, aproximadamente, 67°C. É possível obter uma maior diferença de temperatura utilizando uma célula em cima de outra (em cascata).

Uma dos parâmetros a ter em conta na escolha de uma célula é o seu Coeficiente de Performance, C.O.P.

$$\text{C.O.P.} = \frac{\text{calor absorvido na junção fria (watt)}}{\text{potência fornecida}}$$

$$\text{C.O.P.} = \frac{Q_f}{VI}$$

em que Q_f (em watt) é determinado tendo em conta as características da célula.

Uma célula com C.O.P. elevado consome menos potência e, conseqüentemente, a quantidade de calor total rejeitada na junção quente ($Q_f + P_f$) é menor.

A escolha da célula ideal deverá ser um compromisso entre a diferença de temperatura desejada, a quantidade de calor que deve ser retirado pela célula (calor absorvido na junção fria) e a fonte de alimentação disponível para esta operar. Para tal são disponibilizadas, pelo fornecedor, curvas de performance. Sabendo a temperatura das junções e o calor absorvido na junção fria (em watt) é possível determinar a tensão a que a célula deve operar.

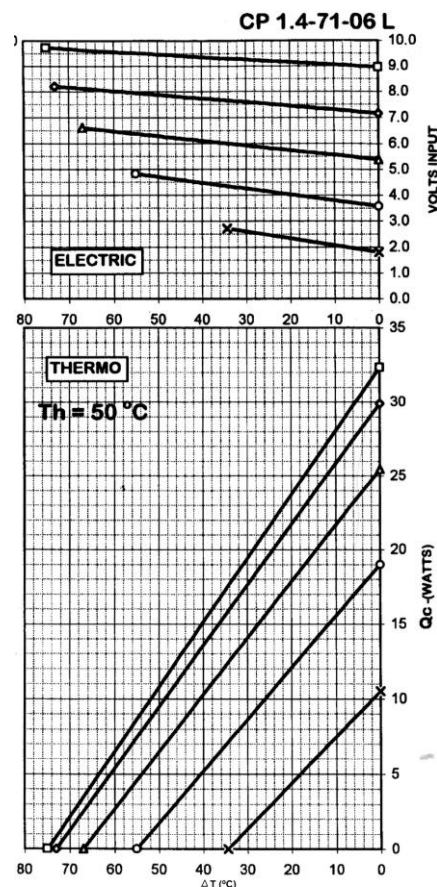


Figura 3-10 Curva de Performance de uma célula de Peltier.

(Anexo)

Enquanto uma célula em modo refrigerador tem o seu máximo C.O.P. para pequenas diferenças de temperatura, em modo gerador é necessário uma grande diferença de temperatura para atingir máxima eficiência.

A eficiência destes geradores é definida como:

$$\text{Eficiência} = \frac{\text{potência produzida}}{\text{calor que atravessa a célula (watt)}}$$

em que o calor que atravessa a célula é determinado conhecendo-se as características da própria célula e a diferença de temperatura entre as junções.

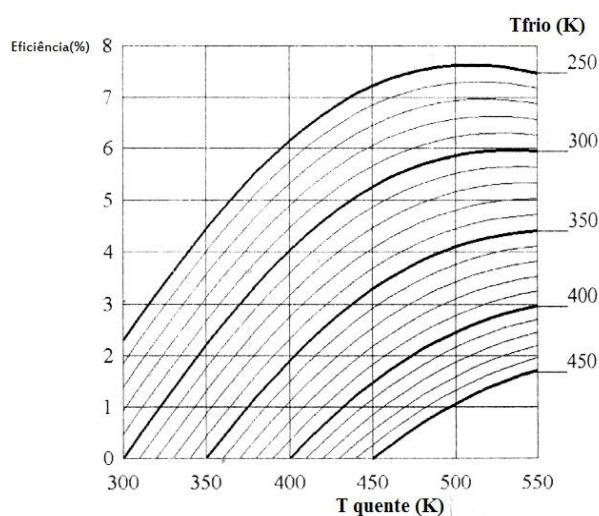


Figura 3-11 A eficiência como gerador depende da diferença de temperatura das junções da célula.

(adaptado de [9])

A eficiência destes geradores ainda é muito baixa pelo que a sua utilização está restrita a dispositivos que necessitem de uma pequena tensão.

Em Anexo encontra-se documentação fornecida pela *Melcor* - empresa responsável pela construção das células utilizadas neste trabalho.

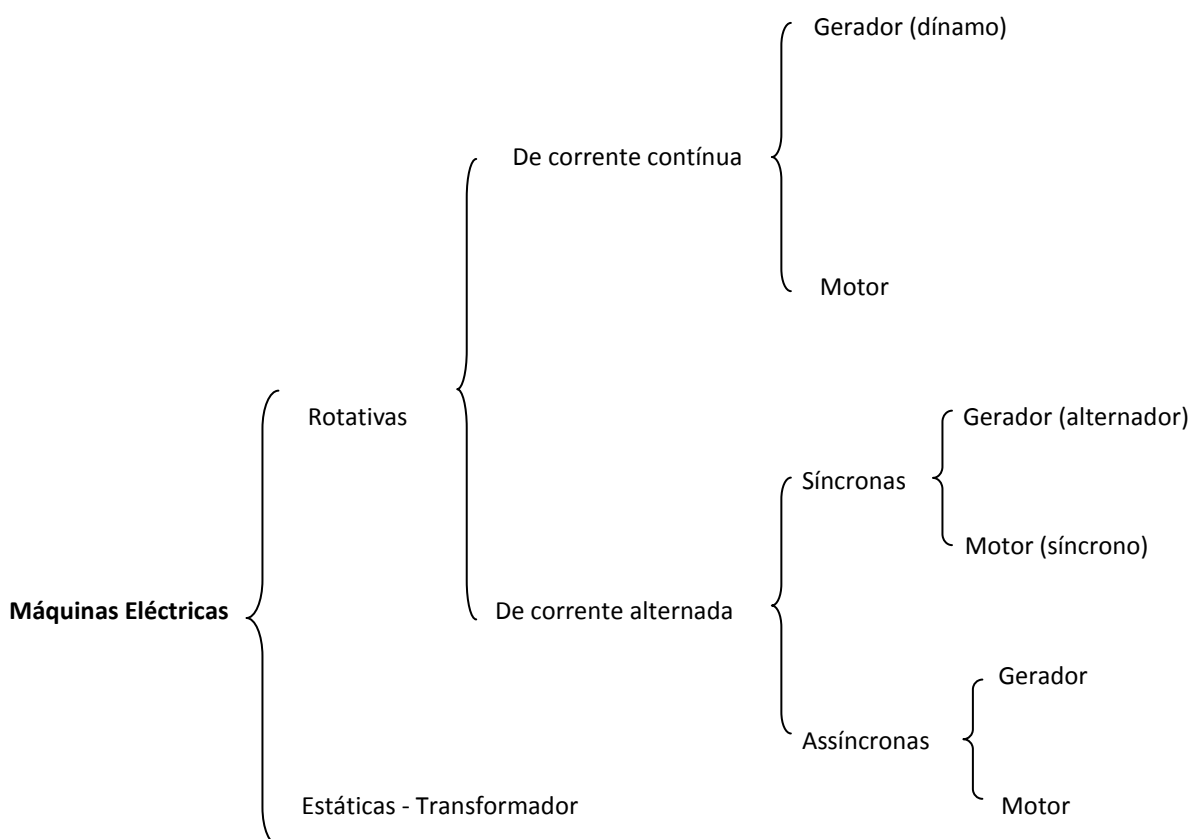
3.3 Máquinas eléctricas

Na construção do material didáctico referido neste trabalho foram utilizados motores e geradores de corrente contínua, no entanto julga-se pertinente uma breve explicação dos princípios de funcionamento de máquinas eléctricas de corrente contínua e alternada.

Classificação das máquinas eléctricas

Existe uma enorme variedade de máquinas eléctricas presentes no nosso dia-a-dia. São exemplos o automóvel e o aspirador (motores), as centrais produtoras de energia eléctrica (geradores) os telemóveis (transformadores).

As máquinas eléctricas podem ser classificadas da seguinte forma:



Os transformadores são máquinas estáticas, isto é, não tem peças em movimento, baseiam o seu funcionamento na indução magnética e destinam-se a elevar ou baixar o valor de uma tensão ou de uma corrente.

As máquinas rotativas são designadas por geradores quando transformam energia mecânica em energia eléctrica e motores quando transformam energia eléctrica em mecânica.

O funcionamento destas máquinas eléctricas baseia-se nas Leis de Lenz, Faraday e Laplace.

Transformação de energia mecânica em energia eléctrica - gerador

As leis de Lenz e Faraday dizem, no essencial, o seguinte: "Sempre que um condutor ou uma espira se movimentam dentro de um campo magnético, perpendicularmente às suas linhas de força, aparece aos seus terminais uma tensão induzida, V_{ind} , que tende a opor-se à causa que lhe deu origem; se o condutor ou espira forem ligados a uma carga o circuito será percorrido por uma corrente induzida".

Esta tensão é provocada pela variação do fluxo magnético através do condutor ou da espira, devido ao seu movimento no campo magnético.

A grandeza da tensão induzida é proporcional à quantidade de linhas de força que são cortadas por unidade de tempo de acordo com a seguinte formulação da Lei de Faraday:
$$V_{ind} = -\frac{d}{dt} \int_S (\vec{B} \cdot d\vec{s})$$

em que \vec{B} é o campo magnético e $d\vec{s}$ é um elemento infinitesimal da superfície S definida pelo perímetro da espira.

Se o condutor ou a espira deixarem de rodar, deixa de haver variação do fluxo e portanto também tensão induzida. Este é o princípio de funcionamento de um gerador.

Gerador de corrente alternada (alternador)

Um gerador de corrente alternada é constituído por uma espira que gira entre os pólos de um íman. Cada terminal da espira é ligado a um anel condutor – anéis colectores que rodam solidariamente com a espira. Duas escovas, fixas e encostadas aos anéis, fazem a ligação com o circuito exterior.

A tensão induzida e a corrente mudam de direcção cada vez que a espira gira 180° conforme mostra a Figura 3-12. A tensão de saída deste gerador é alternada e por isso este gerador síncrono tem a designação de alternador.

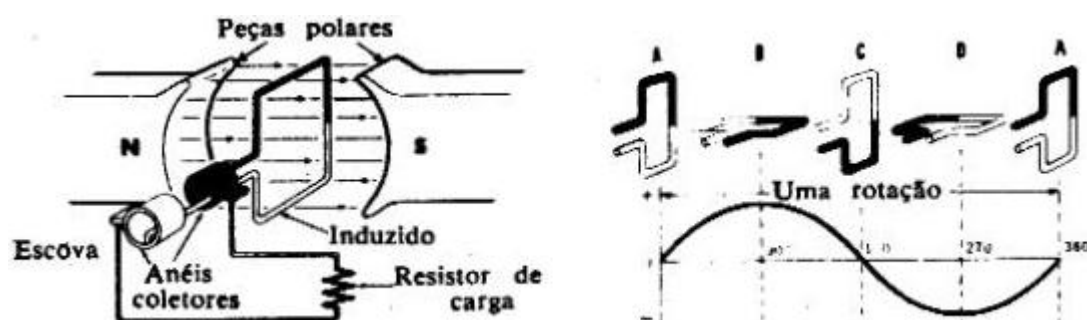


Figura 3-12 Esquema de um gerador elementar e representação sinusoidal da tensão de saída

(www.joseclaudio.eng.br)

Gerador de corrente contínua (dínamo)

A tensão sinusoidal obtida pela rotação da espira no campo magnético pode-se tornar unidireccional se invertermos os terminais do condutor sempre que a tensão inverte o seu sinal. Isto é, se a tensão gerada na espira for captada por duas escovas condutoras, cada uma delas em contacto com um segmento (semi-anel) de colector, a corrente no circuito exterior terá sempre o mesmo sentido, embora o seu valor não seja constante.

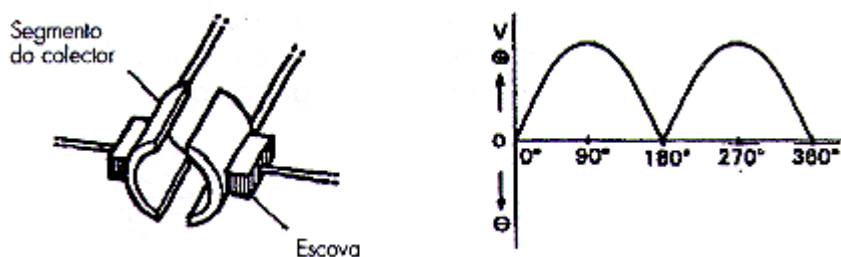


Figura 3-13 Conversão da corrente bidireccional em unidimensional num dínamo

([4])

Para obter uma corrente quase contínua utilizam-se N espiras ligadas a N pares de lâminas. Durante o movimento de rotação cada espira produz a sua tensão desfasada das outras. No entanto, só durante um espaço de tempo curto, em que o valor da tensão é máximo, é que cada par de lâminas se encontra em contacto com as escovas. Desta forma a tensão obtida é praticamente constante.

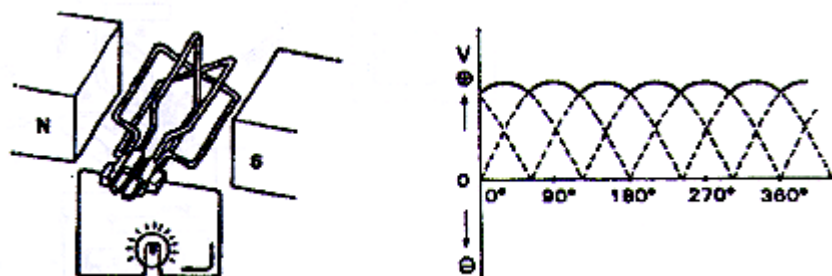


Figura 3-14 Conversão da corrente bidireccional em unidimensional

([4])

Transformação de energia eléctrica em energia mecânica – motores

A Lei de Laplace pode ser enunciada da seguinte forma: Se um condutor (ou espira), alimentado por uma fonte de energia eléctrica, for introduzido no seio de um campo magnético, exerce-se sobre ele uma força electromagnética que o faz deslocar com um determinado sentido; a força exercida sobre o condutor é directamente proporcional à intensidade do campo magnético de indução, à intensidade da corrente que atravessa o condutor e ao seu comprimento.

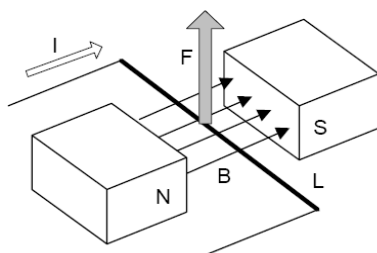


Figura 3-15 Força electromagnética num condutor em condução no seio de um campo magnético, $F_m = BIL$

([4])

No caso das máquinas rotativas, estas são constituídas por enrolamentos com várias espiras, apoiadas num eixo, pelo que o conjunto entra em movimento de rotação. Este é o princípio de funcionamento de um motor eléctrico.

Motor de corrente alternada – síncrono

A construção de um motor síncrono é equivalente à de um alternador podendo um substituir o outro sem prejuízo de desempenho.

Assim, uma máquina eléctrica síncrona pode funcionar como alternador ou como motor:

- quando o seu eixo é submetido a um movimento de rotação, isto é, quando é fornecida energia mecânica, a máquina produz energia eléctrica funcionando como um alternador;
- quando se fornece energia eléctrica a máquina produz energia mecânica através do movimento de rotação do seu eixo, com o mesmo rendimento.

Motor de Corrente Contínua

Num motor de corrente contínua a espira, apoiada sobre um eixo de rotação e localizada em frente de dois pólos N e S, é alimentada por uma fonte de corrente contínua através de dois anéis e respectivas escovas.

Cada segmento da espira fica sujeita a uma força electromagnética de igual intensidade mas sentido oposto. Estas duas forças criam um binário motor responsável pela rotação da espira, conforme mostra a Figura 3-16

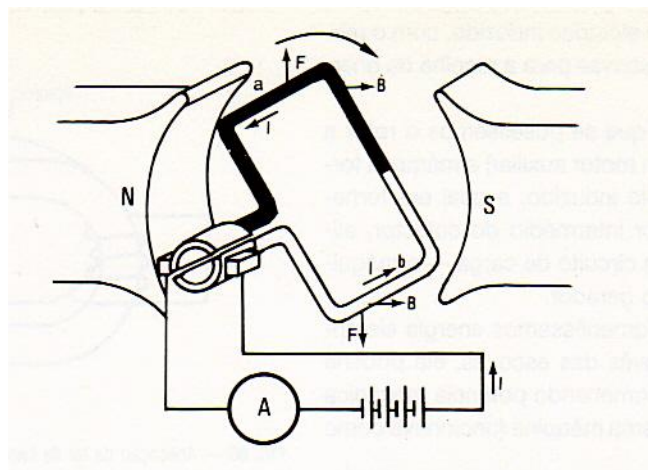


Figura 3-16 Princípio de funcionamento do motor de corrente contínua utilizando uma só espira.

([5])

Ao inverter o sentido da corrente (invertendo as polaridades da fonte de alimentação) o sentido de rotação do motor também se inverte.

Tal como no caso da máquina síncrona, a máquina de corrente contínua pode funcionar como motor ou como gerador (dínamo) dependendo da forma de energia que lhe é fornecida.

Rendimento de uma máquina eléctrica

Dado existirem perdas de energia nas transformações de energia mecânica para eléctrica e vice-versa tornou-se necessário definir uma grandeza indicativa dessas perdas. Assim, define-se rendimento como a relação entre a energia útil e a energia absorvida pela máquina.

Para um motor:

$$\text{Rendimento} = \frac{\text{Energia mecânica produzida}}{\text{Energia eléctrica fornecida}} \times 100\%$$

Para um gerador:

$$\text{Rendimento} = \frac{\text{Energia eléctrica produzida}}{\text{Energia mecânica fornecida}} \times 100\%$$

As perdas de energia tem causas várias podendo ser:

- perdas eléctricas por efeito de Joule nos enrolamentos;
- perdas magnéticas inerentes ao meio ferromagnético;
- perdas mecânicas por atrito nos apoios e rolamentos.

As células de Peltier e as máquinas eléctricas permitem demonstrar facilmente a conversão de energia. Numa célula de Peltier, energia térmica e energia eléctrica convertem-se uma na outra. Numa máquina eléctrica a energia cinética (ou mecânica) transforma-se em energia eléctrica (dínamo) ou vice-versa (motor).

No seguinte capítulo descrevem-se algumas montagens experimentais nas quais se utilizam estes dispositivos.

4 Materiais Didácticos

Neste capítulo descrevem-se alguns equipamentos construídos com o intuito de demonstrar a equivalência das várias formas de energia e de tornar mais motivante a aprendizagem da Física. Todos versam o mesmo conteúdo - transformações e transferências de energia. São alternativas à histórica Experiência de Joule no sentido da conversão do trabalho mecânico em calor, directamente, ou por via do trabalho eléctrico.

Assim, são cinco os equipamentos construídos:

1. Tubo de cartão com esferas, permite demonstrar a 1ª Lei da Termodinâmica e a equivalência entre trabalho e calor;
2. Conversor de energia com dínamo, permite demonstrar a conversão entre as várias formas de energia (mecânica, radiante, térmica e eléctrica);
3. Plataforma elevatória, permite demonstrar as várias conversões de energia desde a energia potencial gravítica a energia térmica;
4. Carrinho movido a água quente, permite demonstrar a conversão de energia térmica em energia mecânica;
5. Kit Termoeléctrico, permite demonstrar a conversão de energia térmica em energia mecânica e vice-versa.

Alguns destes equipamentos são de fácil e barata construção podendo mesmo ser construídos pelos alunos, outros requerem alguma prática de laboratório e mesmo a ajuda de profissionais. A construção do *Carrinho movido a água quente* ou do *Conversor de energia com dínamo* poderá servir de ponto de partida para uma alargada discussão e sensibilização da comunidade escolar sobre o consumo e formas de energia alternativas. Estes projectos poderão ser desenvolvidos no âmbito da Área de Projecto.

Qualquer dos equipamentos pode ser utilizado em contexto de sala de aula como demonstração qualitativa de transformações e transferências de energia entre sistemas.

Ao nível do ensino secundário é possível um estudo mais aprofundado envolvendo a análise quantitativa dos resultados experimentais e versando conteúdos programáticos essenciais do 10º ano, fundamentalmente.

Todos os resultados experimentais apresentados foram obtidos em laboratório com os equipamentos descritos.

Tentou-se utilizar materiais disponíveis ou de fácil aquisição. Em apêndice apresentam-se instruções de construção mais detalhadas, preços e locais de aquisição dos materiais utilizados.

4.1 Enquadramento curricular

Importa contextualizar, obedecendo às orientações curriculares e aos programas oficiais das disciplinas de Ciências Físico-Químicas e Física-Química, a utilização destes equipamentos no 3ºciclo do ensino básico e ensino secundário.

Ao nível do 7º ano pretende-se iniciar os alunos no conhecimento científico e na prática laboratorial pelo que a utilização dos equipamentos e a análise dos resultados reveste-se, essencialmente, de um carácter qualitativo. Assim, no tema “*Terra em Transformação*” especificamente no sub-tema “*Energia: Fontes e formas de energia e transferências de energia*” a aplicação da generalidade dos equipamentos permitem as seguintes aprendizagens específicas [6]:

- Identificar diferentes manifestações de energia.
- Admitir que a energia pode ser transferida de um sistema para outro.
- Identificar as fontes e os receptores de energia em transferências de energia.
- Distinguir transferência de transformação de energia.
- Usar, num dado contexto, os termos “calor” e “ temperatura”.
- Distinguir bons e maus condutores térmicos.
- Interpretar os significados físicos dos conceitos de conservação e dissipação de energia.

Relativamente ao 10ºano, em que o tema aglutinador é a *Energia*, é possível e desejável uma análise quantitativa dos resultados experimentais.

“O programa do 10ºano desenvolve-se em torno da compreensão da Lei da Conservação da Energia, permitindo o enquadramento de diversos conceitos (de áreas como a Termodinâmica, a Mecânica e a Electricidade) numa perspectiva de educação ambiental. Organiza-se, assim, em torno de duas ideias fundamentais: a conservação e a degradação da energia. Pouco perceptível na observação de fenómenos reais, a conservação da energia torna-se patente se, em primeiro lugar, for evidenciada a inevitável degradação. É pois, por este segundo conceito estruturante que se prevê iniciar o estudo. O cálculo de rendimentos e a realização de balanços energéticos constituem meios de concretizar estes conceitos, demasiado abstractos, nesta fase de aprendizagem da Física.” [7]

Cumprindo o Módulo Inicial “*Das fontes de energia ao utilizador*” cuja finalidade é sistematizar e consolidar conhecimentos adquiridos no 3º ciclo do ensino básico, aborda-se o tema “*Conservação de Energia*” com os seguintes objectivos de aprendizagem. [7]:

- Identificar trabalho e calor como quantidades de energia transferidas entre sistemas.
- Distinguir trabalho, calor e potência e explicitar os valores destas grandezas em unidades SI.
- Identificar transferências de energia como trabalho, calor e radiação.
- Interpretar fisicamente a Lei da Conservação de energia.
- Aplicar a lei de Conservação de energia a situações do dia-a-dia, efectuando balanços energéticos

A Unidade 1 – *Do Sol ao Aquecimento* explora a 1ª e a 2ª Leis da Termodinâmica.

“Esta Unidade tem como objectivo central a compreensão de que os fenómenos que ocorrem na Natureza obedecem a duas leis gerais - a 1ª e a 2ª Leis da Termodinâmica - que, em conjunto, regem a evolução do Universo: o modo como as mudanças se processam é condicionado por uma característica sempre presente – a conservação da energia em sistemas isolados.”.[7]

São objectivos de aprendizagem do conteúdo” *A energia no aquecimento /arrefecimento de sistemas*” .[7]:

- Interpretar a 1ª Lei da Termodinâmica a partir da Lei Geral da Conservação da energia.
- Interpretar situações em que a variação de energia interna se faz à custa de trabalho, calor ou radiação.
- Estabelecer balanços energéticos em sistemas termodinâmicos.
- Calcular o rendimento de processos de aquecimento/arrefecimento.
- Explicitar que os processos que ocorrem espontaneamente na Natureza se dão sempre num determinado sentido – o da diminuição da energia útil do Universo (2ª Lei da Termodinâmica).

Como sugestões metodológicas, também definidas no programa, aplicam-se as seguintes [7]:

- Observação de situações em que o aumento de energia interna de um sistema se faça à custa de trabalho (ex. elevação da temperatura originada por agitação mecânica de um

batedor eléctrico ou inversão brusca de um tubo contendo grãos de chumbo, de modo que estes caiam na vertical um elevado número de vezes).

- Pesquisa e debate sobre as experiências de Thomson e de Joule que levaram ao reconhecimento que o calor é energia. Confrontando as interpretações dadas na época, com as actuais, poderá ser evidenciada a natureza do conhecimento científico e o carácter dinâmico da Ciência. A discussão poderá proporcionar a oportunidade de explorar eventuais concepções erróneas sobre calor e energia interna, ainda prevalentes nos alunos.

Relativamente à Plataforma Elevatória podem, ainda, ser abordados alguns objectivos do conteúdo “*A energia de sistemas em movimentos de translação*”. A saber [7]:

- Relacionar o trabalho do peso com a variação da energia potencial gravítica.
- Indicar que o valor da energia potencial gravítica num ponto só é conhecido de for estabelecido um nível de referência.
- Relacionar a variação da energia mecânica de um sistema com o trabalho realizado por forças não conservativas.
- Calcular rendimentos em sistema mecânicos.
- Relacionar a dissipação de energia com um rendimento de sistemas mecânicos inferior a 100%.

Embora a temática destes equipamentos seja desenvolvida unicamente no 7º e 10º ano, estes poderão ser utilizados como demonstração da utilidade e do funcionamento de alguns componentes de um circuito eléctrico, de acordo com o programa do 12º ano. Assim, os objectivos programáticos a alcançar são os que se seguem [8]:

- Identificar o condensador como um dispositivo que armazena energia.
- Definir capacidade de um condensador e indicar a unidade SI.
- Identificar aplicações dos condensadores no dia-a-dia.
- Definir intensidade de corrente, diferença de potencial e resistência de um condutor.
- Indicar as características de que depende a resistência de um condutor.
- Associar o gerador a um elemento do circuito que transfere energia para o circuito.
- Associar o receptor a um elemento do circuito para onde é transferida energia.
- Explicar o efeito de Joule com base em considerações energéticas.

4.2 Equipamentos didáticos

4.2.1 Balanços energéticos em sistemas termodinâmicos

Tubo de cartão com esferas

Este equipamento pode ser construído pelos alunos recorrendo a material existente na escola. É de fácil execução, barato e demonstra de uma forma muito prática o aumento da energia interna de um sistema à custa da realização de trabalho e a equivalência entre trabalho e calor.



Figura 4-1 Tubo de cartão, esferas de chumbo e termómetro

Objectivos específicos

- Estabelecer balanços energéticos.
- Reconhecer que a energia interna de um sistema pode ser alterada pela realização de trabalho.
- Determinar a relação entre a unidade de energia sob a forma de calor (caloria) e a unidade de energia sob a forma de trabalho (joule).

Princípio

A energia potencial gravítica, mgh , das esferas de chumbo é convertida em energia cinética durante a queda de uma altura h . Ao atingir a base a energia cinética é convertida em calor proveniente da vibração molecular e detectado através de um aumento de temperatura. A energia interna do corpo sofreu uma alteração à custa do trabalho.

No entanto, nem toda a energia potencial gravítica é convertida em calor – ocorre dissipação de energia durante o processo sendo o seu valor determinado por aplicação da 1ª Lei da Termodinâmica.

Conhecidos os valores da variação da energia potencial gravítica e da variação da energia interna (em calorias) é possível estabelecer a equivalência entre caloria e Joule.

Montagem experimental

Material:

- Tubo de cartão (por exemplo, de 70 cm de comprimento e 5,5 cm de diâmetro) – Papelaria Fernandes
- 1 kg de esferas de chumbo – á venda em qualquer fornecedor de reagentes químicos ou casa de artigos de pesca.
- 2 rolhas de borracha com o diâmetro do tubo
- Cola para borracha
- Termómetro digital

A uma das extremidades do tubo é colada uma rolha de borracha.

A outra rolha é furada para introduzir o termómetro.

Procedimento experimental

- Mede-se a massa das esferas de chumbo.
- Introduzem-se no tubo de cartão.
- Regista – se a sua temperatura.
- Inverte-se o tubo cerca de 50 vezes.
- Regista – se a temperatura final das esferas.

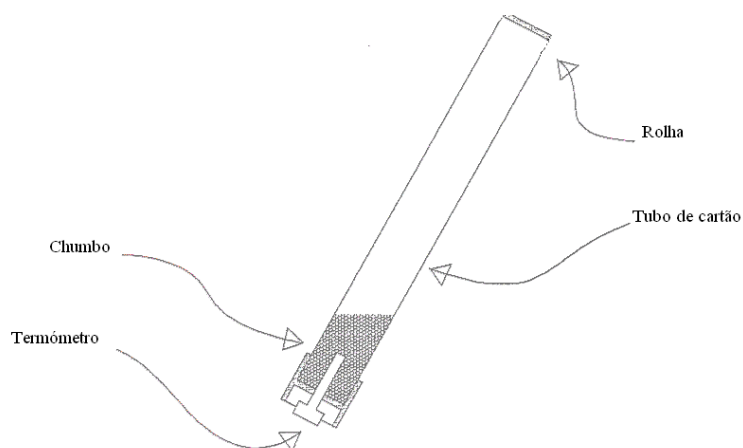


Figura 4-2 Interior do tubo

Resultados/Exploração de resultados

	1º ensaio	2º ensaio	3º ensaio
$\theta_{\text{inicial}}/^{\circ}\text{C}$	24,1	24,1	23,5
$\theta_{\text{final}}/^{\circ}\text{C}$	25,4	25,5	24,9
$\Delta\theta/^{\circ}\text{C}$	1,3	1,4	1,4
$\Delta\theta_{\text{médio}}/^{\circ}\text{C}$	1,4		

$$m_{\text{chumbo}} = 998,75 \text{ g}$$

$$h = 50 \times 54,6 \text{ cm (altura de queda)}$$

$$c_{\text{chumbo}} = 128 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$c_{\text{chumbo}} = 0,031 \text{ cal g}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

De acordo com as orientações definidas no programa da disciplina esta experiência pode ser explorada de duas formas distintas:

a) *Equivalência entre trabalho mecânico e calor.*

Trabalho e calor são duas formas de quantificar a energia transferida entre sistemas. Joule é a unidade SI de energia , mas como demonstrar facilmente a relação entre caloria e Joule?

O trabalho realizado pela força gravítica sobre as esferas é dado por:

$$W = m g h$$

$$W = 0,99875 \times 9,8 \times 50 \times 0,546 \quad W = 267 \text{ J}$$

A energia transferida para as esferas de chumbo sob a forma de trabalho aumenta a sua energia interna que pode ser quantificada através da variação da sua temperatura:

$$\text{Sendo } \Delta E_i = m c \Delta\theta$$

$$\Delta E_i = 998,75 \times 0,031 \times 1,4$$

$$\Delta E_i = 43,34 \text{ cal}$$

pelo que: 1 cal = 6,16 J

O factor de conversação admitido actualmente é 1cal = 4,1855J pelo que o erro relativo da medição,

$$\varepsilon_r = \frac{|x - X|}{X}, \text{ é } 0,321 \text{ ou } 32,1\%.$$

Este valor, embora da mesma ordem de grandeza, apresenta um elevado erro. Dado a simplicidade do equipamento não seria de esperar um resultado melhor. De notar que, ao desprezar a energia perdida para o tubo e para o ambiente introduz-se um erro considerável nos cálculos da determinação do equivalente Joule-caloria.

Tendo como ponto de partida a análise destes resultados poder-se-á fazer uma contextualização histórica desta equivalência enfatizando o contributo de Thomson e de James Joule e da sua célebre Experiência da Roda de Pás.

b) Aplicação da 1ª Lei da Termodinâmica

Houve variação da energia interna do sistema? Como é detectável essa variação? A que ficou a dever-se ?

Como explicar esta situação com base na 1ª Lei da Termodinâmica?

A variação da energia interna de um sistema é igual à quantidade de energia transferida para as vizinhanças ou cedida por elas, como trabalho (W), calor (Q) ou radiação (R) – 1ª Lei da Termodinâmica,

$$\Delta E_i = Q + W + R$$

Neste caso, W é o trabalho realizado sobre o sistema ($W > 0$) - trabalho realizado pela força gravítica sobre as esferas; Q o calor libertado pelo sistema para o tubo e ar circundante ($Q < 0$) e R a energia transferida sob a forma de radiação, que é desprezável.

O trabalho realizado sobre o sistema tem o valor 267J (calculado anteriormente).

Conhecendo-se a equivalência Joule-caloria é possível determinar a variação de energia interna do sistema em Joule.

Assim:

$$\Delta E_i = m c \Delta \theta \qquad \Delta E_i = 0,99875 \times 128 \times 1,4 \qquad \Delta E_i = 178,9 \text{ J}$$

O calor libertado (energia dissipada) para o tubo de cartão e ar envolvente é

$$Q = E_{\text{dissipada}} = 178,9 - 267,2 = - 88,3 \text{ J}$$

Cerca de 33% de energia é dissipada sob a forma de calor.

De facto esta elevada percentagem de energia dissipada, desprezada no estabelecimento da equivalência Joule-caloria , justifica o desfasamento entre o valor encontrado e o valor correcto.

A energia degradada, isto é, o calor dissipado para o ambiente e para o próprio tubo dependerá do material de que este é feito? Se o tubo for de PVC os resultados serão iguais? Poder-se-á abordar o

conceito de condutividade térmica e discutir com os alunos possíveis formas de melhorar o equipamento substituindo o material do tubo ou forrando o seu interior de acordo com os dados da tabela

Material	Condutividade térmica [W/(m K)]
Cobre	372
Ferro	52
Vidro	0,72 - 0,86
Cartão	0,10-0,30
	0,13-0,29
Madeira (pinho)	0,11 - 0,14
Fibra de vidro	0,04
Cortiça	0,06-0,07

As transformações e transferências de energia ocorridas podem ser esquematizadas num diagrama de energia conforme mostra a Figura 4-3.

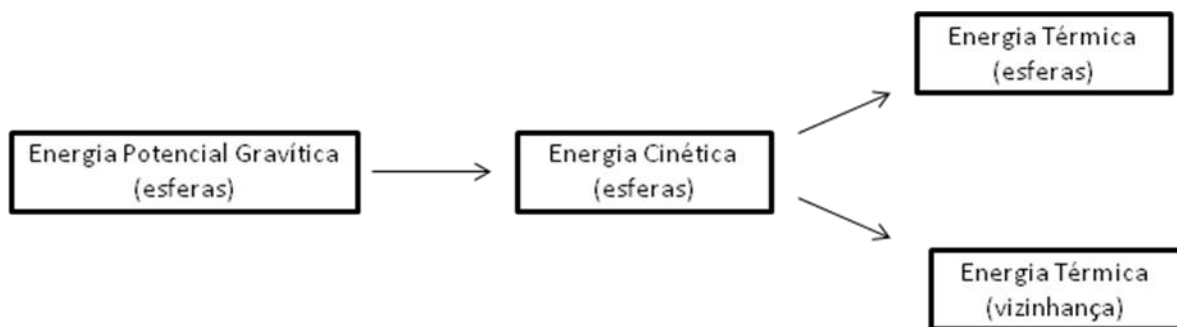


Figura 4-3 Diagrama de energia

O aluno, depois de comparar os valores obtidos, concluirá que o trabalho realizado não é integralmente aproveitado pelo sistema e que houve degradação de energia. Poder-se-á explorar o conceito de sistema físico aberto, fechado e isolado. O nosso dia-a-dia está repleto de exemplos de sistemas abertos e fechados. E isolados?

Este processo é um processo irreversível pois a queda das esferas acontece de forma espontânea. Quando ocorre um processo irreversível a energia total do Universo mantém-se constante; no

entanto, uma parte dessa energia degrada-se; diminui a capacidade de realizar trabalho. A partir destas constatações poder-se-á explorar a 2ª Lei da Termodinâmica enunciando-a da seguinte forma: Os processos que ocorrem na Natureza de forma espontânea dão-se no sentido da diminuição da energia útil do Universo.

Poder-se-á introduzir o conceito de entropia como uma medida da desordem das partículas do sistema e estabelecer outras formas de enunciar a 2ª Lei: Em todos os processos naturais, irreversíveis, um sistema evolui no sentido em que há aumento da entropia do Universo.

Existem no mercado equipamentos sofisticados para a determinação da equivalência trabalho-calor.

Utilizando o mesmo princípio do equipamento descrito existe, da Pasco, – *Mechanical Equivalent of Heat Tube* (ref:ET-8781). Este equipamento possui um sensor de temperatura ligado a uma placa metálica que se encontra numa das extremidades do tubo. A recolha e análise de dados são realizadas recorrendo ao *Datastudio Software*. Assim, permite o traçado de gráficos temperatura da placa metálica - tempo e o cálculo automático do valor do trabalho da força gravítica e do calor.

Da Pasco, também, mas utilizando outro princípio de funcionamento – *Mechanical Equivalent Of Heat Apparatus* (ref: TD-8551-A). Um cilindro de alumínio é colocado em rotação através de uma manivela, e aquecido graças à força de fricção causada por uma fita de nylon que se encontra enrolada em torno do cilindro, com um peso suspenso numa das suas extremidades. A fricção exercida entre a corda de nylon e o cilindro converte o trabalho mecânico em calor. Um conta-rotações regista o número de voltas do cilindro e um termistor mede a sua variação de temperatura.



Figura 4-4 Equipamento para determinar o equivalente mecânico do calor

(www.pasco.com)

Estes equipamentos pela sua sofisticação produzem resultados mais precisos mas tem como desvantagem o custo elevado. Além disso, o facto de serem os alunos a construir o próprio equipamento aproxima-os da ciência e do conhecimento científico.

4.2.2 Transformações de energia

Conversor de energia com dínamo

Este equipamento é aplicável, em contexto de sala de aula, nos 7º, 10º e 12º ano.

A sua construção é algo elaborada necessitando da ajuda do professor. Poderá ser desenvolvido na Área de Projecto do 10º ou 12º ano embora esteja mais enquadrado nas unidades programáticas do 10º ano.

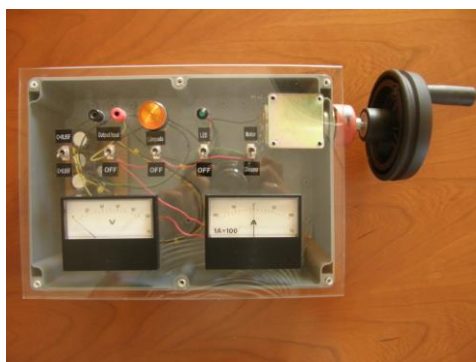


Figura 4-5 Conversor de energia com dínamo

Objectivos específicos

-Demonstrar a conversão:

- de energia cinética em energia eléctrica;
- de energia eléctrica em energia cinética;
- de energia radiante em energia eléctrica;
- de energia potencial gravítica em energia eléctrica;
- de energia eléctrica em energia térmica;

-Estabelecer a diferença entre corrente e potencial eléctricos;

-Estabelecer balanços energéticos em sistemas termodinâmicos, identificando as parcelas que correspondem à energia útil e à energia dissipada no processo;

-Determinar rendimentos.

Princípio

Um dínamo é actuado por uma manivela ou uma roldana. A tensão eléctrica induzida é acumulada numa associação de condensadores de elevada capacidade. A energia acumulada nos condensadores é dada por:

$E = \frac{1}{2} CV^2$ onde C é a capacidade dos condensadores e V a diferença de potencial com que ficam carregados.

Um voltímetro e um amperímetro com o zero ao centro são usados para medir o estado de carga dos condensadores e a corrente que flui num sentido ou no outro (para ou dos condensadores).

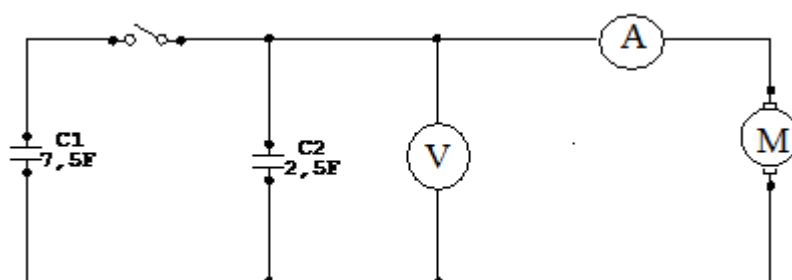


Figura 4-6 Esquema eléctrico simplificado

Vários tipos de carga podem usar a energia acumulada:

- o dínamo pode funcionar como motor;
- uma lâmpada de filamento;
- um LED(luz fria);
- uma resistência eléctrica para aquecimento de água (calorímetro).

O dínamo também pode ser actuado por um fio que se desenrola da gola da roldana por acção de uma massa, de valor conhecido, em queda. É possível determinar o rendimento do dínamo deixando descer a massa ao longo de uma determinada altura. Da razão entre a energia acumulada e a energia potencial gravítica perdida pela massa obtém-se o rendimento.

Uma célula solar exterior quando irradiada permite produzir energia que carrega os condensadores. A corrente produzida pode ser medida.

Montagem experimental

Este equipamento é constituído por uma caixa na qual se encontra o dínamo, os condensadores, uma lâmpada e um LED. Para realizar todas as actividades experimentais referidas abaixo é, ainda,

necessário um painel fotovoltaico, uma massa marcada de 1 kg e um calorímetro com resistência acoplada.

A construção do equipamento encontra-se, detalhadamente, no Apêndice 1- Instruções de construção dos kits

Procedimento experimental /Resultados e Exploração

a) Conversão de energia cinética em energia eléctrica

-Com o selector em **Dínamo** faz-se rodar a manivela, observa-se que o ponteiro do voltímetro acusa uma diferença de potencial crescente. O valor lido corresponde à tensão nos condensadores. O ponteiro do amperímetro desloca-se indicando a passagem de corrente para os condensadores.

-Liga-se o interruptor da lâmpada de filamento ou do LED e observa-se o seu brilho. O ponteiro do amperímetro desloca-se no sentido oposto indicando, agora, a passagem de corrente dos condensadores para a lâmpada.

O aluno (12º ano) deve experimentar carregar os condensadores nas duas opções: $C = 1,85 \text{ F}$ e $C = 10,85 \text{ F}$ e verificar que para obter a mesma tensão é necessário um maior número de voltas da manivela para o de maior capacidade. Maior capacidade implica maior quantidade de carga armazenada pelo que demora mais tempo a carregar.

De notar o sentido da corrente eléctrica indicado pelo amperímetro. Quando os condensadores estão a carregar a corrente flui do dínamo para estes. Quando estão a descarregar o sentido é dos condensadores para a lâmpada.

Ao ligar o LED em vez da lâmpada verifica-se que o tempo de descarregamento do condensador é maior pois o LED consome menos energia.

b) Conversão de energia eléctrica em energia cinética

-Depois de carregar os condensadores rodando a manivela, selecciona-se **Motor** e a manivela gira em sentido contrário.

O dínamo comporta-se, agora, como motor. Qual a diferença entre um e outro?⁸

⁸ Consultar Motor de Corrente Contínua, página 36

c) *Conversão de energia radiante em energia eléctrica*

-Liga-se a **Output/Input**, por meio de fios eléctricos isolados, um pequeno painel solar.

-Irradia-se o painel com luz solar ou luz branca até carregar os condensadores. Este processo requer uma luz bastante intensa e demora algumas horas. Liga – se a lâmpada ou o LED e observa – se o seu brilho.

Os alunos reconhecem a energia solar como fonte de energia alternativa mas com algumas limitações. Dado o pequeno tamanho do painel o tempo de carregamento dos condensadores é significativo quando comparado com o tempo de carregamento através do dínamo.

Quais serão as condições de iluminação ideais para um rendimento máximo do painel?

Iluminação normal do laboratório ou uma lâmpada de elevada potência? Qual o ângulo mais conveniente entre a lâmpada e o painel? Seria vantajoso interpor um filtro adequado? Qual?

d) *Conversão de energia potencial gravítica em energia eléctrica*

-Enrola-se na gola da roldana um fio ao qual se prende uma massa de 1kg.

-Selecciona-se **Dínamo** e deixa-se cair a massa de uma altura de 1 metro.

-Repete-se o ensaio algumas vezes até os condensadores acusarem alguma carga.

-Liga-se a lâmpada ou o LED e observa-se o seu brilho.

e) *Conversão de energia eléctrica em energia térmica*

-Liga-se a **Output/Input**, por meio de fios eléctricos isolados, o calorímetro no qual foi introduzido um termómetro digital e uma pequena quantidade de água ($\approx 7\text{mL}$).

-Carregam-se os condensadores (seleccionando **$C = 10,85\text{ F}$**) com uma energia correspondente a um mínimo de uma tensão de 2 V.

-Selecciona-se o **Output/Input** e observa-se o aumento de temperatura da água.



Figura 4-7 Calorímetro com termómetro digital

Porque razão a água aquece? Oportunidade para relembrar o Efeito de Joule como o fenómeno responsável pelo aquecimento da resistência e consequentemente da água.

Será indiferente o valor da resistência?

Como construir uma resistência de valor conhecido a partir de um fio de cromo-níquel de diâmetro conhecido? Quais os factores de que depende o valor da resistência?

Será possível aquecer água aproveitando a energia potencial gravítica “perdida” durante a queda de um corpo?

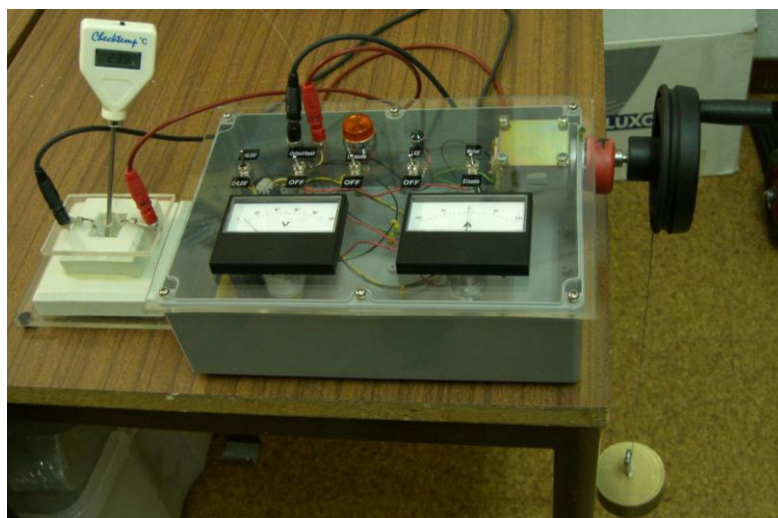


Figura 4-8 Montagem destinada ao aquecimento de água

- Coloca-se, no calorímetro, 7,0 g de água.
- Regista-se o valor da temperatura da água.
- Liga-se o calorímetro a **Output/Input**.
- Seleccionando a capacidade **10,85 F** e **Dínamo**, faz-se cair a massa de 1 kg de uma altura de 1 m, catorze vezes.
- Regista-se a tensão correspondente.
- Selecciona-se **Output/Input** e regista-se a temperatura máxima da água.
- Repete-se o ensaio três vezes.

	1º ensaio	2º ensaio	3º ensaio
$\theta_{\text{inicial}}/^{\circ}\text{C}$	25,2	25,4	25,4
$\theta_{\text{final}}/^{\circ}\text{C}$	25,9	26,0	26,1
$\Delta\theta/^{\circ}\text{C}$	0,7	0,6	0,7
$\Delta\theta_{\text{médio}}/^{\circ}\text{C}$	0,7		

$$C = 10,85 \text{ F}$$

$$h = 1,0\text{m}$$

$$n^{\circ} \text{ quedas} = 14$$

$$m = 1,0 \text{ kg}$$

$$V = 2 \text{ V (valor indicado pelo voltímetro após a queda do corpo)}$$

$$m_{\text{água}} = 7,0 \text{ g}$$

$$C_{\text{água}} = 4180 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$g = 9,8 \text{ m s}^{-2}$$

Para alunos do 10º ano é aconselhável uma exploração quantitativa dos resultados determinando o rendimento do processo de aquecimento da água por acção da queda do corpo. Assim:

$$\text{de } E_{pg} = mgh$$

$$E_{pg} = 1,0 \times 9,8 \times (14 \times 1,0)$$

$$E_{pg} = 137,2 \text{ J}$$

A E_{pg} corresponde à energia fornecida ao sistema. Esta energia, depois de se transformar em energia cinética durante a queda e em eléctrica por acção do dínamo, transforma-se em energia térmica, por Efeito de Joule, na resistência de aquecimento aumentando a temperatura da água contida no calorímetro.

Pela variação de temperatura da água, calcula-se a energia recebida, isto é, a energia útil.

$$Q_{\text{recebida(água)}} = m_{\text{água}} C_{\text{água}} \Delta\theta_{\text{água}}$$

$$Q_{\text{recebida(água)}} = 7,0 \times 10^{-3} \times 4180 \times 0,7 = 20,482 \text{ J}$$

A energia dissipada no processo é:

$$E_d = E_f - E_u, \text{ sendo igual a } 116,71 \text{ J}$$

O rendimento é dado pela razão entre a energia fornecida e a energia útil,

$$\eta = \frac{Q_{\text{recebido(água)}}}{E_{pg}} \quad \therefore \eta = \frac{20,482}{137,2} = 0,149 = 15\%$$

Porquê um rendimento tão baixo?

Analisemos a conversão de energia cinética, durante a queda, em energia eléctrica através do cálculo do rendimento do dínamo:

Este pode ser determinado pela razão entre a energia potencial gravítica do sistema “corpo+Terra” e a energia acumulada nos condensadores.

$$\text{De } E = \frac{1}{2} CV^2$$

$$E = \frac{1}{2} 10,85 \times 2^2 = 21,7 \text{ J}$$

$$\text{Sendo } \eta = \frac{E}{E_{pg}} \quad \eta = \frac{21,7}{137,2} \quad \therefore \eta = 0,16 = 16\%$$

Analisando os dois resultados e tendo em conta o nível de rigor utilizado nos cálculos poder-se-à admitir que o rendimento deste processo corresponde ao rendimento do dínamo. Poder-se-ão registar algumas perdas de energia nos fios eléctricos mas o seu valor parece ser desprezável.

Quanto ao processo de aquecimento propriamente dito, transformação de energia eléctrica em térmica, o seu rendimento será muito próximo de 100% visto que toda a energia proveniente do Efeito de Joule é aproveitada para o aquecimento da água.

De referir a dificuldade de medição da temperatura da água devido às correntes de convecção. Convém agitar um pouco o calorímetro e aguardar uns instantes até que a temperatura homogeneíze.

Como foi dito atrás, ao nível do 7ºano pretende-se apenas um efeito demonstrativo das várias formas de energia e das possíveis conversões. As formas de energia mais conhecidas dos alunos estão presentes: energia radiante, térmica, cinética e eléctrica.

Este protótipo pode ser alvo de algumas melhorias, a saber:

- No calorímetro, em vez de um termómetro pode-se instalar um sensor de temperatura do tipo termopar, mais rigoroso a medir pequenas variações de temperatura. O orifício para entrada do termopar será mais pequeno o que minimizará as perdas de energia através da tampa.

- Os aparelhos de medida (voltímetro e amperímetro) podem ser substituídos por medidores digitais em que a leitura se torne mais fácil, no entanto relativamente ao amperímetro perde-se o efeito da variação do sentido da corrente dado pela deslocação do ponteiro de um para outro lado.

Existe um grande número de equipamentos à venda que ilustram as várias transformações de energia, além disso é possível construir com os alunos desde o 7ºano pequenos dispositivos que ilustrem estas conversões. A vantagem deste conversor é que utilizando um único equipamento é possível verificar e analisar qualitativa e quantitativamente várias transformações e transferências. O custo de produção não é elevado e o material é fácil de adquirir. A sua construção não é complicada mas é necessária a ajuda do professor para a montagem do circuito eléctrico.

Plataforma Elevatória

Este equipamento, de utilização muito simples, demonstra que a energia se transforma e transfere ao longo de uma cadeia energética onde a fonte é a energia potencial gravítica do experimentador e o receptor final é a água contida no calorímetro.

Qualquer pessoa colocada na plataforma e que desça por acção do seu peso “gera” energia suficiente para aquecer uma pequena porção de água.

A sua utilização em contexto de sala de aula ou em exposições de ciência apela à interactividade e coloca o indivíduo como parte integrante do equipamento.

Esta experiência é uma alternativa á Experiência de Joule em que a única diferença resulta do facto de a energia utilizada para aquecer a água ser de origem eléctrica e não mecânica.

Neste caso optou-se pela omissão do processo de construção do equipamento visto ser algo complicado e necessitar da intervenção de profissionais de serralharia. O dispositivo é constituído por uma plataforma elevatória em metal que desliza ao longo de duas calhas verticais. Na plataforma está acoplado um motor com caixa redutora. Este é ligado, por meio de fios eléctricos, a uma resistência montada na tampa de um pequeno calorímetro. O calorímetro possui uma resistência bobinada acoplada e um termopar muito fino para que seja facilmente aquecido. Nesta montagem utilizou-se um termopar tipo K.



Figura 4-9 Plataforma com calorímetro e sensor de temperatura

Objectivos específicos

- Demonstrar a conversão de energia potencial gravítica em energia térmica;
- Calcular rendimentos.

Princípio

Uma plataforma móvel desce por acção do peso de uma pessoa. A energia potencial gravítica do sistema “ pessoa+Terra”é convertida, por meio de um motor com caixa redutora, em energia eléctrica. Este motor funciona como gerador e visto ter caixa redutora o número de rotações é multiplicado por o factor de redução. O motor está ligado a uma resistência mergulhada em água num calorímetro. A energia eléctrica, por efeito de Joule, transforma-se em energia térmica aumentando a temperatura da água.

Procedimento experimental

- Medir a massa da pessoa e da água a colocar no calorímetro.
- Mergulhar o sensor de temperatura (termopar) na água.
- Ligar os terminais da resistência ao dínamo.
- Travar a plataforma, na sua altura máxima, aproximadamente 0,5 m do chão.
- Subir para a plataforma e colocar os pés chegados à frente de forma que o peso do corpo esteja aplicado essencialmente na ponta do pé e não no calcanhar.
- Destruar a plataforma.
- Aguardar alguns instantes até que a temperatura da água estabilize e registar o seu valor.

Resultados/ Exploração de resultados

Embora o propósito deste equipamento seja essencialmente demonstrativo, sabendo o rendimento, é possível a análise quantitativa da experiência.

Assim sendo, registaram-se os valores da temperatura inicial e final da água bem como a massa da água, a massa do corpo em queda e a altura da queda.

	1º ensaio	2º ensaio	3º ensaio
$\theta_{\text{inicial}}/^{\circ}\text{C}$	18,6	17,4	17,6
$\theta_{\text{final}}/^{\circ}\text{C}$	20,4	19,0	19,1
$\Delta\theta/^{\circ}\text{C}$	1,8	1,6	1,5
$\Delta\theta_{\text{médio}}/^{\circ}\text{C}$	1,6		

$$R = 29,5 \, \Omega$$

$$h = 51,5 \, \text{cm}$$

$$m_{\text{corpo}} = 51,1 \, \text{kg}$$

$$m_{\text{água}} = 7,1 \, \text{g}$$

$$c_{\text{água}} = 4180 \, \text{J kg}^{-1} \, ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$g = 9,8 \, \text{m s}^{-2}$$

Aplicando a Lei da Conservação da energia:

$$E_{\text{inicial}} = E_{\text{final}}$$

$$E_{pi} + E_{ci} = E_{pf} + E_{cf} + E_{fornecida}$$

A energia cinética inicial, E_{ci} , e a energia potencial gravítica, E_{pf} , são nulas. A energia cinética final, E_{cf} , é desprezável.

Este valor foi calculado experimentalmente medindo o tempo de descida e admitindo que o movimento de queda é uniforme.

Assim, para um corpo de 78,3 kg o tempo de queda é 1,59 s sendo,

$$v_{\text{descida}} = 0,324 \, \text{m s}^{-1} \quad \text{e} \quad E_c = 4,11 \, \text{J} \text{ valor desprezável relativamente à } E_{pi}.$$

A energia fornecida ao dínamo, $E_{fornecida}$, provém da energia potencial gravítica do sistema “ corpo + Terra”.

$$E_{fornecida} = E_{pg} = m_{\text{corpo}} gh \quad E_{fornecida} = 257,9 \, \text{J}$$

Esta energia depois de convertida em cinética, é convertida em energia eléctrica no dínamo e transferida para a resistência, que por Efeito de Joule, aquece a água.

A energia útil é medida pela variação de temperatura da água.

$$E_{\text{útil}} = Q$$

$$Q = m_{\text{água}} c \Delta\theta \quad Q = 50,52 \, \text{J}$$

Sendo o rendimento:

$$\eta = E_{\text{util}}/E_{\text{fornecida}}$$

$$\eta = 19,58\%$$

Sabendo que o rendimento do motor é cerca de 30%⁹ seria de esperar um valor aproximado. A diferença poder-se-á dever à dissipação de energia por atrito nas peças metálicas. Determinou-se, então, a força de atrito média durante a descida, recorrendo a um dinamómetro instalado na plataforma.

$$F_a = 78,4 \text{ N}$$

A energia dissipada por atrito é dada pelo trabalho realizado pela força de atrito,

$$W_{Fa} = F_a h$$

$$E_d = 40,376 \text{ J}$$

Então, a energia disponibilizada para o aquecimento é $E_{pg} - E_d = 217,53 \text{ J}$

Determinou-se o rendimento considerando este valor como energia fornecida o que se traduziu numa maior aproximação ao valor do rendimento esperado.

$$\eta = 23,22 \%$$

Há a considerar algumas limitações da montagem que afectam necessariamente o rendimento:

- limitações na construção da plataforma.
- isolamento deficiente do calorímetro;
- ausência de agitação constante da água;

O deficiente isolamento do calorímetro conduz a perdas de energia não contabilizadas para o ambiente. A ausência de agitação constante da água provoca erros na leitura da temperatura devido às correntes de convecção. As limitações na construção da plataforma reduzem o seu rendimento devido à existência de forças de atrito de torção. Este é condicionado pelo peso do corpo em queda.

O dispositivo foi testado com corpos de diferentes pesos e verificou-se que quanto menor é o peso do corpo em queda maior é o rendimento do processo.¹⁰

Massa/kg	Rendimento/%
51,1	19,6
69,9	15,8
78,3	14,4

⁹ Valores determinados experimentalmente: Apêndice 2 – Estudo do rendimento de um motor com caixa reductora

¹⁰ Folha de cálculo: Apêndice 3 – Estudo da Plataforma

Esta variação deve-se ao atrito de torção exercido pelas calhas laterais na plataforma elevatória. A força que o corpo exerce na plataforma (de intensidade igual ao peso) tem um efeito rotativo pois o seu momento, em relação ao ponto de união à calha, é diferente de zero. Este efeito é contrariado pela calha que, assim, exerce uma força de atrito adicional. Quanto maior for o peso da pessoa maior é o momento da força que tem como efeito um aumento do atrito.

Sabedo o rendimento do equipamento poder-se-à explorar a experiência apelando à resolução de problemas como o exemplo que se segue:

De que altura terias de descer para aquecer água para uma chávena de chá de 250 mL. Considera a água à temperatura ambiente de 20 °C e a temperatura do chá 50 °C?

A energia necessária para aquecer a água (energia útil) dependerá da sua massa e da variação de temperatura pretendida:

$$Q = m c \Delta\theta$$

$$Q = 0,250 \times 4180 \times 30 = 31350 \text{ J}$$

Tendo em conta o rendimento da plataforma para uma pessoa de 51,1 kg é possível calcular a energia que terá de ser fornecida ao sistema:

$$0,196 = \frac{31350}{E_f} \quad \therefore E_f = 1,6 \times 10^5 \text{ J}$$

Para fornecer esta quantidade de energia é necessário descer de uma altura dada por:

$$E = m g h$$

$$1,6 \times 10^5 = 51,1 \times 9,8 \times h \quad \therefore h = 317 \text{ m}$$

Com este equipamento também é possível estabelecer a equivalência caloria – joule.

Assim, utilizando os dados anteriores:

$$m_{\text{água}} = 7,1 \text{ g}$$

$$E_{\text{pg}} = 257,9 \text{ J}$$

$$\eta = 30,0 \%^{11}$$

$$\Delta\theta = 1,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

¹¹ Rendimento do motor

e sabendo que $c_{\text{água}} = 1 \text{ cal g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

A energia útil é dada, em calorias, por:

$$Q = 7,1 \times 1,0 \times 1,6 = 11,36 \text{ cal}$$

Sabendo o rendimento e a energia fornecida, calcula-se a energia útil, em unidades SI:

$$0,30 = \frac{E_u}{257,9} \quad \therefore E_u = 77,37 \text{ J}$$

Donde:

$$1 \text{ cal} = \frac{77,37}{11,36} = 6,81 \text{ J}$$

Este valor apresenta um desvio assinalável em relação ao valor correcto, 4,18J. Esse desvio deve-se, essencialmente, ao facto de o valor do rendimento ser o do motor não inserido na plataforma. Como foi referido anteriormente existem forças de atrito entre a plataforma elevatória e as calhas laterais que conduzem a uma dissipação de energia para o equipamento e para o ambiente.

Este dispositivo pode ser melhorado tendo em conta os seguintes aspectos:

- A plataforma elevatória deve estar presa às calhas pelo seu centro de gravidade (centro geométrico) impedindo assim a existência de um efeito rotativo e consequentemente do atrito de torção.
- O sistema de desengate deve ser acessível à pessoa que se coloca no degrau.
- A plataforma deve ter um manípulo onde a pessoa se segure durante a queda.

4.2.3 Dispositivos termoelétricos

Carrinho a água quente

Este equipamento demonstra, de uma forma lúdica, o funcionamento de um gerador termoelétrico. Recorrendo a água quente coloca-se em movimento um carrinho adaptado para o efeito.

É fácil de construir embora o uso de Células de Peltier encareça o seu custo. Constitui um brinquedo científico passível de integrar uma Área de Projecto do 7.º ano.



Figura 4-10 Carrinho movido a água quente

Objectivos específicos

- Ilustrar o funcionamento de um gerador termoelétrico
- Demonstrar a conversão de energia térmica em eléctrica
- Demonstrar a conversão de energia eléctrica em mecânica

Princípio

Num reservatório isolado, contendo duas Células de Peltier, é colocada água quente. A diferença de temperatura entre a água quente e o ambiente é suficiente para gerar uma diferença de potencial capaz de colocar em andamento um pequeno carrinho comandado, por fios, à distância.

Montagem experimental

O reservatório de água é construído em poliestireno expandido com duas janelas abertas dos lados.

As Células de Peltier são coladas aos dissipadores e às placas de alumínio, estas por sua vez são coladas nas janelas do reservatório, conforme mostra a Figura 4-11.

As células são ligadas entre si em paralelo e ligadas ao comando do carrinho em substituição das pilhas.

O reservatório é colocado dentro de uma caixa de madeira com uma pega e uma tampa. O comando pode ser fixado a esta caixa recorrendo a uma tira de velcro, conforme mostra a Figura 4-10

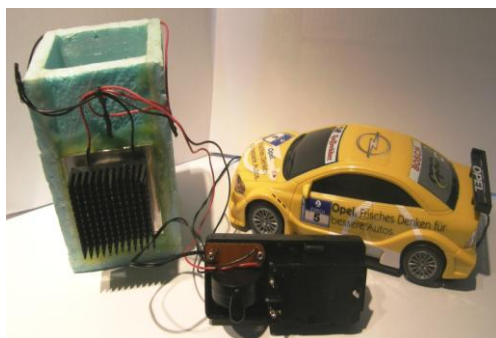


Figura 4-11 Carrinho, comando e reservatório

No Apêndice 1- Instruções de construção dos kits, encontram-se os procedimentos de construção mais detalhados.

Procedimento experimental

-Enche-se o reservatório com água fervente e manobra-se o carrinho utilizando o comando.

Visto que o carrinho está preso ao reservatório por um fio é conveniente que este mantenha uma trajectória nas suas proximidades. Se o carrinho tiver uma roda de direcção pode-se fixar esta roda diagonalmente de forma que a trajectória descrita seja circular em redor do reservatório.

Exploração de resultados

Embora apenas qualitativamente podem ser exploradas as várias formas de energia e suas transformações/transferências.

Os conceitos de calor e temperatura também poderão ser abordados.

Considerando o sistema “carrinho+recipiente” poder-se-á distinguir os vários componentes de um circuito eléctrico, tal como a fonte de energia, o receptor e o condutor.

O equipamento seria mais espectacular se o reservatório se encontrasse dentro do carrinho. Foi testado um protótipo em forma de carrinha com caixa fechada em que a caixa era o recipiente da água quente. O motor era mais potente pelo que necessitava de um maior número de células de Peltier o que tornava o equipamento muito dispendioso. Além disso, devido ao peso excessivo da água a sua autonomia era diminuta.

A partir do mesmo princípio podem ser construídos diversos brinquedos como por exemplo um comboio que se desloque num carril circular com o reservatório colocado no centro da trajectória.

Kit termoelétrico

Equipamento que demonstra o funcionamento da célula de Peltier como gerador termoelétrico e como refrigerador. Permite a análise quantitativa dos resultados obtidos.

A sua construção é muito simples podendo ser executada pelos alunos numa Aula Experimental. É mais aconselhado para o ensino secundário.

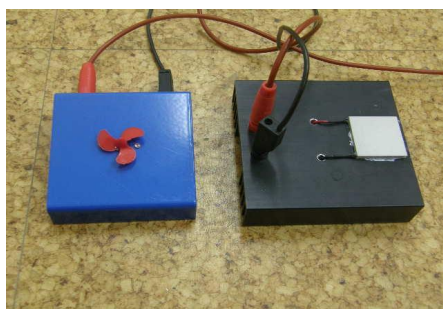


Figura 4-12 Kit Termoelétrico

Objectivos específicos

-Ilustrar o funcionamento de um refrigerador termoelétrico.

- Conversão de energia eléctrica em energia térmica.

-Ilustrar o funcionamento de um gerador termoelétrico.

- Conversão de energia térmica em eléctrica
- Conversão de energia eléctrica em mecânica

-Determinar rendimentos.

Princípio

Ao ligar uma pilha de 4,5 V ao módulo a tensão vai originar uma libertação de calor num dos lados da célula (lado quente) e uma absorção de calor (lado frio) no outro lado (Efeito de Peltier). Ao inverter a polaridade do circuito inverte – se, também, o lado quente e o frio.

Ao colocar um reservatório com água quente sobre a célula de Peltier, a diferença de temperatura com o meio ambiente gera uma pequena tensão (Efeito de Seebeck) capaz de colocar em movimento uma ventoinha acoplada a um motor. Se, em vez de água quente, colocar água fria a ventoinha roda em sentido contrário.

Montagem experimental

A célula de Peltier é colada ao dissipador o qual é furado para a passagem dos fios eléctricos que são soldados aos respectivos terminais.

No Apêndice 1- Instruções de construção dos kits encontram – se os procedimentos de construção mais detalhados.

Procedimento experimental / Resultados e exploração

a) Como Refrigerador/Aquecedor termoeléctrico

-Liga-se o módulo de Peltier á fonte de alimentação.

-Ao fim de alguns instantes observa-se uma alteração de temperatura da célula. Trocando a polaridade a face anteriormente quente torna-se fria.

Como aplicação quantitativa pode-se determinar o rendimento do aquecimento recorrendo ao módulo de Peltier em vez da vulgar resistência de aquecimento. Para tal:

-Coloca-se 30 mL de água no gobelé, tapa-se com uma rolha furada na qual se instala um termómetro digital ou um sensor de temperatura. Liga-se o módulo de Peltier a uma fonte de alimentação regulável ($I \approx 1$ A; $V \approx 5$ V).

-Liga-se a fonte em simultâneo com o cronómetro.

-Regista-se os valores da tensão e da intensidade de corrente fornecidos, a temperatura da água, $\theta_{\text{água}}$, e o tempo de aquecimento, Δt .¹²

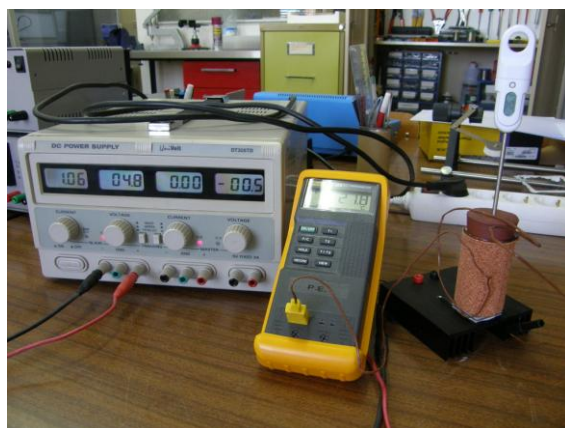


Figura 4-13 Medição de V, I e θ em modo refrigerador

¹² Apêndice 4 – Estudo do Kit Termoeléctrico

A célula de Peltier ao ser submetida a uma tensão DC gera uma diferença de temperatura. Na junção quente é libertado calor aproveitado para aquecer uma massa de água aí colocada.

Pretende-se determinar o rendimento deste processo de aquecimento (e não a eficiência da célula).

A partir dos resultados experimentais:

$$I_{\text{médio}} = 0,833 \text{ A}$$

$$V_{\text{médio}} = 4,854 \text{ V}$$

$$m_{\text{água}} = 30,0 \text{ g}$$

$$c_{\text{água}} = 4180 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

é possível determinar:

$$P_{\text{fornecida}} = VI \quad P_{\text{fornecida}} = 4,04 \text{ W}$$

$$Q_{\text{recebido(água)}} = m_{\text{água}} c_{\text{água}} \Delta\theta_{\text{água}} \quad \text{pelo que:}$$

$$P_{\text{útil}} = mc \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

Do gráfico variação de temperatura em função do tempo de aquecimento, Figura 4-14, obtém-se o declive da recta, $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$.

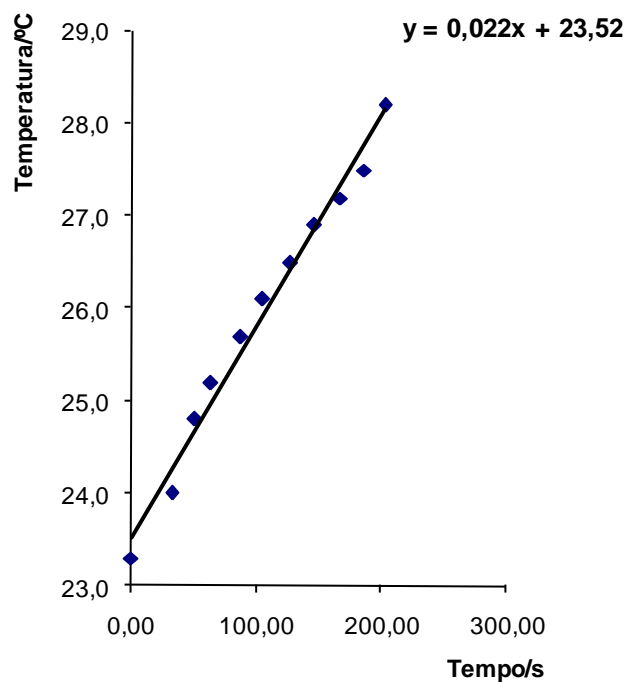


Figura 4-14 Temperatura em função do tempo. A azul: valores determinados experimentalmente. A preto: linearização a partir dos valores experimentais

Assim, sendo o declive igual a 0,0228, $P_{util}=2,86$ W

$$\eta = \frac{P_u}{P_f} \times 100\%$$

$$\eta = 70,7\%$$

A dissipação de energia deve-se a vários factores que passo a enumerar:

- perdas de energia da célula para o ambiente e para o dissipador de calor devido ao facto de a célula se encontrar no exterior do gobelé. Esta energia é “perdida” antes do próprio processo de aquecimento;
- perdas por condução através das paredes do gobelé e da rolha;
- características próprias da célula de Peltier.

É de salientar, ainda, a dificuldade na medição da temperatura da água visto esta não ser uniforme devido às correntes de convecção. Para minimizar este erro convém agitar o gobelé e esperar que o valor da temperatura estabilize registando só depois esse valor.

b) Como gerador termoeléctrico

- Liga-se o módulo de Peltier ao motor.
- Coloca-se um copo com água fervente em cima da célula. Observa-se o sentido de rotação da ventoinha.
- Coloca-se um copo com água gelada em cima da célula e inverte – se o sentido de rotação da ventoinha

Quantitativamente é possível estabelecer a relação entre a diferença de temperatura das duas junções e a potência gerada pela célula.

- Liga-se o módulo de Peltier ao motor.
- Mede-se a massa de água a colocar no copo.
- Instala-se um termómetro que mergulhe na água e um termopar encostado ao dissipador.
- Intercala-se, no circuito, um amperímetro e um voltímetro.
- Aquece-se a água até à fervura, coloca-se no copo e liga-se o cronómetro.
- Registam-se os valores da tensão aos terminais do módulo de Peltier, V , a intensidade de corrente que percorre o circuito, I , a temperatura da água, $\theta_{água}$, a temperatura do dissipador, θ_{dis} , e o tempo, t .



Figura 4-15 Medição de V , I e θ em modo de gerador termoelétrico

Embora se apresente, em *Apêndice 5 – Estudo do Kit Termoelétrico em modo gerador*, a folha de cálculo referente ao estudo da variação da potência do gerador termoelétrico (célula de Peltier) em função da diferença de temperatura, os resultados obtidos não são reproduzíveis devido à dificuldade na medição da temperatura do dissipador de alumínio.

Analisando o gráfico conclui-se que a potência gerada pela célula aumenta com o aumento da diferença de temperatura entre a junção quente (aquecida pela água) e a junção fria (dissipador de alumínio).

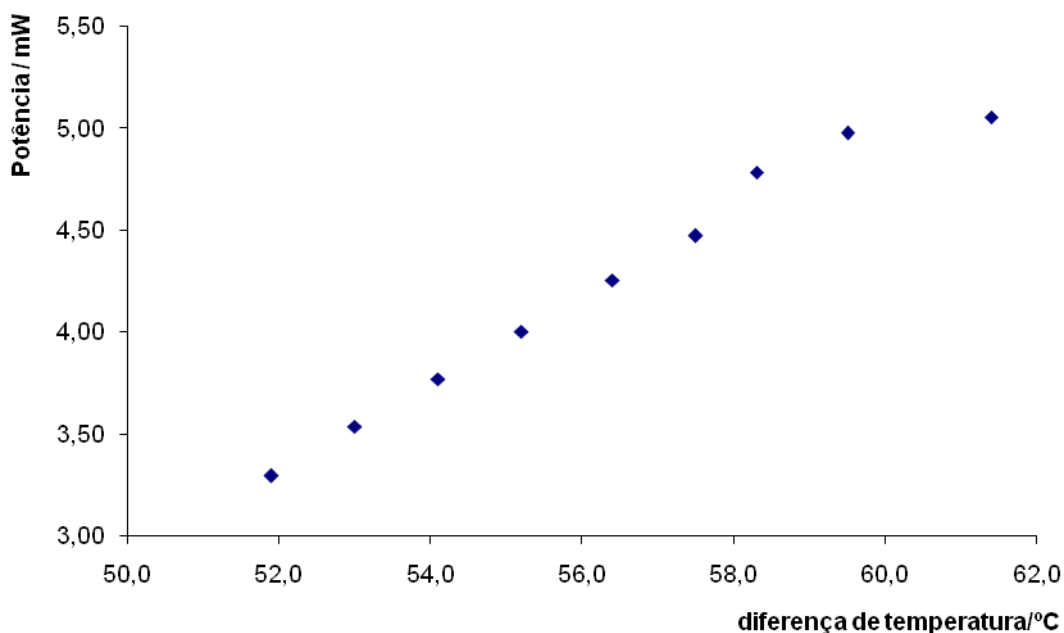


Figura 4-16 Potência da célula em função da diferença de temperatura entre as duas faces da célula. Dados obtidos experimentalmente

Em vez do motor pode-se ligar outro receptor como por exemplo um besouro ou uma lâmpada. Desta forma a contemplar diferentes transformações de energia.

O gobelé que contém a água pode ser substituído por um calorímetro construído em espuma rígida e com o fundo em alumínio ou cobre. Desta forma a quantidade de energia dissipada por condução seria minimizada.

Existe no mercado um modelo mais sofisticado deste equipamento – ref.TD-8550A, *Thermoelectric Converter*, da PASCO.



Figura 4-17 Conversor Termoeléctrico

(www.pasco.com)

Este modelo é mais eficaz como gerador termoeléctrico visto que uma das hastes é mergulhada em água fervente e a outra em água gelada sendo que a diferença de temperatura é significativamente maior que no protótipo construído.

Outra vantagem é o facto de permitir demonstrar que se misturarmos a água quente e fria e aí mergulharmos as duas hastes a ventoinha não roda. A energia interna do volume total de água não sofreu alteração pelo facto de misturarmos a água quente com a fria por isso deveria existir suficiente energia para colocar a ventoinha a girar. Mas este facto constituiria uma violação à 2ª Lei da Termodinâmica segundo o enunciado de Lorde Kelvin – É impossível realizar um processo cujo único efeito seja a produção de trabalho às custas de energia na forma de calor retirada de uma única fonte térmica.

Este equipamento foi concebido para um simples demonstração qualitativa e por isso não permite a montagem de um circuito eléctrico com aparelhos de medida. É mais adequado para exposições interactivas de ciência ou para demonstração, pelo professor, em contexto de sala de aula.

5 Conclusões

Com este trabalho pretendeu-se dar um contributo efectivo para o desenvolvimento da componente experimental da disciplina de Ciências Físico-Químicas do 3º ciclo do ensino básico e de Física-Química do ensino secundário.

Nos dias de hoje em que o interesse dos jovens é disputado por variados meios como a Televisão, Cinema, Música, Net, etc. é urgente cativá-los para a escola como meio mais formal de aprendizagem. O professor tem poderosos aliados - a divulgação científica é veiculada nos jornais, revistas, televisão e Net. É frequente os alunos colocarem, na aula, dúvidas sobre aquilo que viram num programa televisivo ou num mail que “circula” na Net. E porque não aproveitar essas dúvidas para planificar uma actividade experimental que as esclareça?

O ensino das ciências ditas experimentais, tal como o nome indica, reveste-se de um carácter experimental em que o aluno faz parte integrante do processo ensino-aprendizagem. Não se pretende que o aluno siga um protocolo como quem executa uma receita culinária mas sim que seja ele próprio a planificar a actividade que depois executará. Em alguns casos poder-se-à ir um pouco mais longe, levando os alunos a construir os equipamentos utilizados nas actividades.

Tendo como ponto de partida a Experiência de Joule exploraram-se as noções de calor, energia e trabalho.

A primeira tentativa de explicação da natureza do calor surgiu no século XVII com a Teoria do Flogisto, desde aí até à designação de calor como energia decorreram 2 séculos. É no século XIX que Mayer estabelece pela primeira vez o equivalente mecânico do calor a atribui a capacidade de convertibilidade às várias formas de energia. Joule tornou possível a demonstração científica desta equivalência construindo e aperfeiçoando equipamento que lhe permitiu estabelecer o equivalente mecânico do calor com uma margem de erro muito pequena face ao valor actualmente aceite pela comunidade científica.

A famosa Experiência de Joule embora de grande importância didáctica não é de fácil reprodução em sala de aula pelo que o desafio era a construção de equipamentos que permitissem provar a convertibilidade das várias formas de energia e a determinação do equivalente mecânico do calor, isto é, a relação entre caloria e Joule.

Assim, recorrendo a material de fácil aquisição construíram-se protótipos de equipamentos e explorou-se a sua utilização didáctica. Os dispositivos de eleição foram os motores e as células de Peltier ainda pouco divulgadas ao nível do ensino secundário. Demonstrou-se claramente a convertibilidade das várias formas de energia e, em alguns casos, realizou-se um tratamento

quantitativo dos resultados com vista ao cálculo de rendimentos e ao estabelecimento da relação entre caloria e Joule.

Pretendeu-se provar que para “fazer ciência” ao nível do ensino básico e secundário não é obrigatório possuir aparelhos dispendiosos e de alta tecnologia. Com alguma imaginação e materiais de fácil aquisição foi possível construir equipamentos que permitem a realização de actividades experimentais.

Os equipamentos foram testados e os resultados obtidos são satisfatórios face aos objectivos definidos.

A maioria destes equipamentos podem e devem ser construídos pelos alunos sob a orientação do docente, em sala de aula ou em área de Projecto. A sua exploração experimental tem em conta os conteúdos leccionados nos vários níveis de ensino.

Nesta área, *Energia*, são inúmeras as possibilidades de construção de equipamentos simples mas espectaculares. Outras formas de energia ficaram por explorar, como por exemplo a energia potencial química, a energia solar, etc.

6 Referências

- [1] SHAMOS, Morris H. *Great Experiments in Physics: Firsthand Accounts from Galileo to Einstein*. Dover Publications, 1987.
- [2] ROWE, D.M., *Thermoelectric Handbook, Macro to Nano*, Taylor & Francis Group, 2006.
- [3] HALLIDAY, David, RESNICK, Robert, WALKER, Jearl, *Fundamentos de Física*, vol 2, 6ª ed., Tradução de André Soares de Azevedo e José Paulo Soares de Azevedo, Rio de Janeiro, LTC Editora, 2003.
- [4] ALVES, Mário Ferreira. *ABC das Máquinas Eléctricas*, Porto, ISEP, 2003. <http://ave.dee.isep.ipp.pt/~malves>, consultado em Junho /2008.
- [5] MATIAS, José Vagos Carreira, *Máquinas Eléctricas de Corrente Contínua*, 1ª ed., Lisboa, Didáctica Editora, 1990.
- [6] GALVÃO, C., NEVES, A., *et al* . *Ciências Físicas e Naturais – Orientações Curriculares – 3º ciclo*. Lisboa, Ministério da Educação-DEB, 2001. http://www.dgidec.min-edu.pt/fichdown/programas/ciencias_fisicas_naturais.pdf, consultado em Junho/ 2008.
- [7] BELLO, Adelaide, CALDEIRA, Helena *et al* . *Programa de Física e Química A – 10º ano*. Lisboa, Ministério da Educação-DES, 2001. http://www.dgidec.min-edu.pt/programs/prog_hom/fisica_quimica_a_10_homol_nova_ver.pdf, consultado em Junho/ 2008.
- [8] FIOLEAIS, Manuel *et al* . *Programa de Física – 12º ano*. Lisboa, Ministério da Educação – DES, 2004. http://www.dgidec.min-edu.pt/programs/prog_hom/fisica_12_homol.pdf, consultado em Junho/2008.
- [9] BUIST, Richard J., LAU, Paul G.. *Thermoelectric Power Generator Design and Selection from TE Cooling Module Specifications*, USA, TE Techonology, Inc, 1997. <http://ieeexplore.ieee.org>, consultado em Setembro / 2007

7 Bibliografia

- ALMEIDA, Guilherme, *Sistema Internacional de Unidades (SI)*, 3ª ed., Lisboa, Plátano Editora, 2002.
- ALVES, Mário Ferreira. *ABC das Máquinas Eléctricas*, Porto, ISEP, 2003.
<http://ave.dee.isep.ipp.pt/~malves>, consultado em Junho /2008.
- BERNAL.J.D., *Ciência na História*, vol.3, Tradução de António Neves Pedro, Lisboa Livros Horizonte, 1976.
- CABRAL, Paulo, *Erros e Incertezas nas Medições*, Porto, ISEP, 2004.
- DEUS, Jorge Dias e outros, *Introdução à Física*, 2ª ed., Lisboa, McGraw-Hill, 2000
- ESTRELA, Edite, SOARES, Maria Almira, LEITÃO, Maria José, *Saber escrever uma tese e outros textos*, 4ª ed., Lisboa, Publicações Dom Quixote, 2006.
- GUAYDIER, Pierre, *História da Física*, Tradução de António Manuel Gonçalves, col, "Biblioteca Básica de Ciência", Lisboa, Edições 70, 1984.
- HALLIDAY, David, RESNICK, Robert, WALKER, Jearl, *Fundamentos de Física*, vol 2, 6ª ed., Tradução de André Soares de Azevedo e José Paulo Soares de Azevedo, Rio de Janeiro, LTC Editora, 2003.
- HALLIDAY, David, RESNICK, Robert, WALKER, Jearl, *Fundamentos de Física*, vol 3, 6ª ed., Tradução de André Soares de Azevedo e José Paulo Soares de Azevedo, Rio de Janeiro, LTC Editora, 2003.
- HANKINS, Thomas L, *Ciência e Iluminismo*, Tradução de Ana Sampaio, col "História e Filosofia da Ciência", Porto, Porto Editora, 2004.
- MATIAS, José Vagos Carreira, *Máquinas Eléctricas de Corrente Contínua*, 1ª ed., Lisboa, Didáctica Editora, 1990.
- MATIAS, José Vagos Carreira, *Máquinas Eléctricas de Corrente Alternada*, 1ª ed., Lisboa, Didáctica Editora, 1990.
- MELCOR, *Applications Notes for Thermoelectric Devices*, <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/007b/0900766b8007ba20.pdf> consultado em Setembro/2008.
- NYE, Mary Jo, *The Cambridge History of Scienc*, vol.5, Cambridge, Cambridge University Press, 2003.
- ROWE, D.M., *Thermoelectric Handbook, Macro to Nano*, Taylor & Francis Group, 2006.
- SÁ, Maria Teresa Marques, *Física – 10º Ano*, 1ª ed., Lisboa, Texto Editora, 1994.

TEODORO, Vitor Duarte, *Física, uma aventura 1 Física e Química A – 10ºAno ou 11º Ano*, 1ª ed., Lisboa, Didáctica Editora, 2007.

WHITFIELD, Peter, *Landmarks in Western Science From Prehistory to the Atomic Age*, London, The Britis Library, 1999.

8 Apêndices

Apêndice 1- Instruções de construção dos kits

Conversor de energia com dínamo



Figura 8-1 Conversor de energia

Material Necessário

Designação	Quant.	Código	Preço unidade/€	Fornecedor
Condensadores electrolíticos de 10F	16	377-423	5,85	www.rsportugal.com
Condensador cerâmico 220 pF	1	473-0373	0,19	www.rsportugal.com
Porta lâmpadas com indicador	1	565-153	2,49	www.rsportugal.com
Fio eléctrico 12mm			< 1,0	Loja de artigos eléctricos
LED de painel 8mm , 2Vdc verde	1	355-6461	1,23	www.rsportugal.com
Motor 4,5V-15Vdc cx redutora	1	3213164	25,40	www.rsportugal.com
Voltímetro de painel	1	1262077	52,22	www.farnell.com
Amperímetro de zero ao centro	1	969850	25,58	www.farnell.com
Volante com manivela	1	286-9558	21,01	www.rsportugal.com
Caixa 26,5 × 18,5 × 5mm	1		10,0	Radipeças
Placa com pistas de cobre 100 × 60	1	206-5841	3,22	www.rsportugal.com
Resistência de 10KΩ	2	132-731	0,04	www.rsportugal.com
Resistência 100KΩ	1	132-977	0,04	www.rsportugal.com
Resistência de 470Ω	1	132-416	0,04	www.rsportugal.com
Comutador on-on	6	448-0747A	1,39	www.rsportugal.com

Painel fotovoltaico 7,5V 45mA	1	194-098	15,24	www.rsportugal.com
Díodo rectificador 1N5821	1	652-7422	0,174	www.rsportugal.com
Placa de acrílico cristal 2100 × 1200 × 5mm	1	9031051	28,82	www.plasticos-do-sado.pt
Alvéolo de painel vermelho	1	433-3326	0,62	www.rsportugal.com
Alvéolo de painel negro	1	433-3332	0,62	www.rsportugal.com
Terminais de 4 vias	1	467-611	2,37	www.rsportugal.com
Lâmpada de 6V	1	586-172	0,36	www.rsportugal.com

-Monte os condensadores¹³ numa base de circuito impresso.

-Monte os restantes componentes no painel conforme mostra a Figura 8-3.

-Antes de montar o volante faça-lhe uma gola para enrolar o fio.

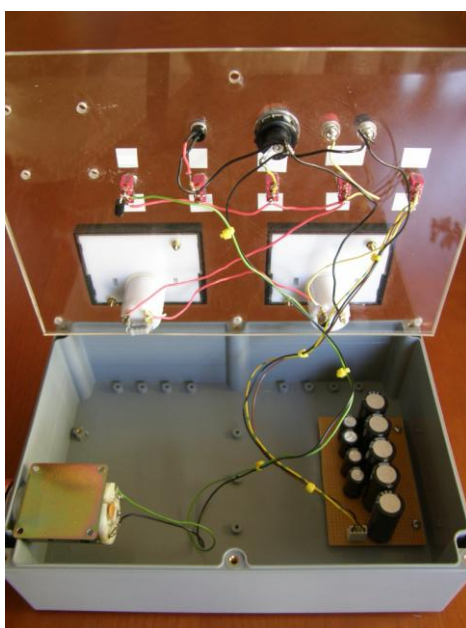


Figura 8-2 Vista da caixa aberta

¹³ A capacidade dos condensadores utilizados no kit testado é diferente embora a capacidade total seja da mesma ordem de grandeza.

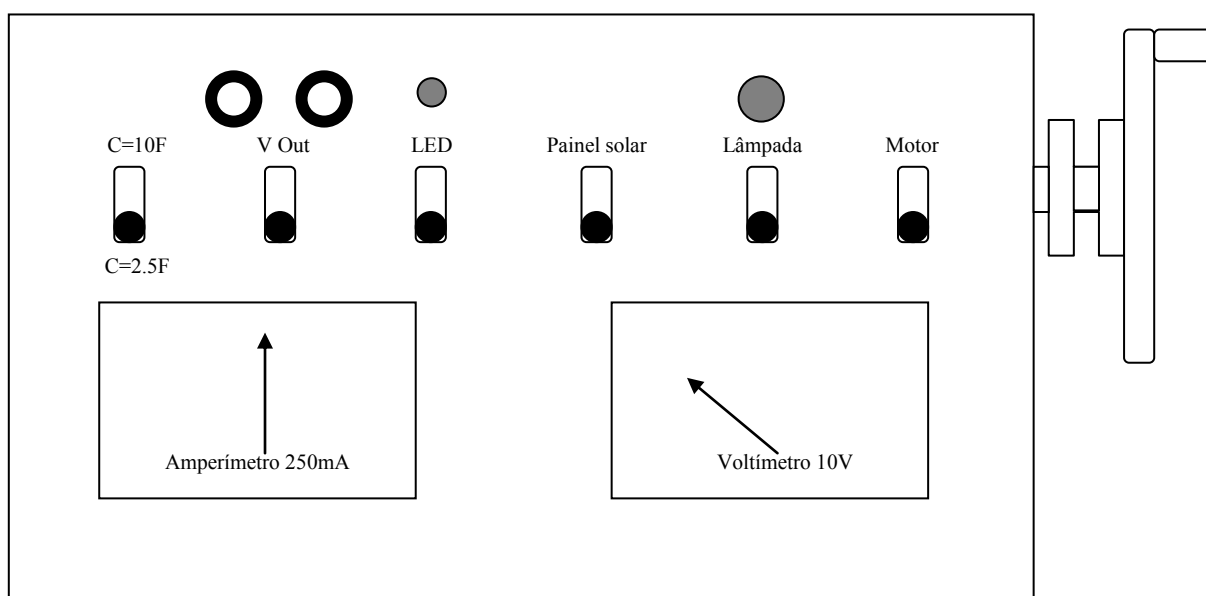
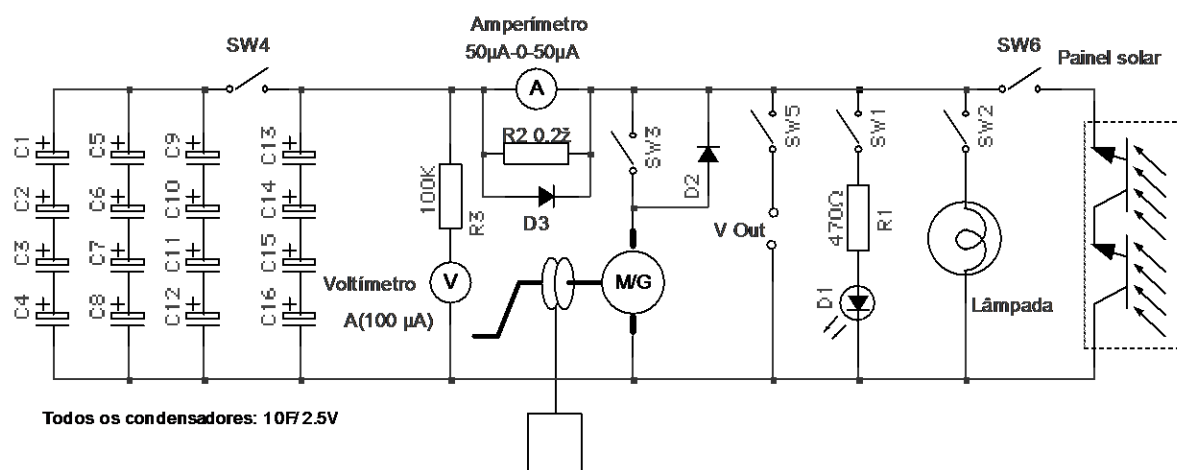


Figura 8-3 Esquemas de montagem

Material necessário para os Acessórios

Designação	Quant.	Código	Preço unidade/€	Fornecedor
Painel fotovoltaico 7,5V 45mA	1	194-098	15,24	www.rsportugal.com
Espuma rígida poliestireno extrudido (XPS) Wallmate 30mm Placa 2600 × 660 × 30 mm	1		6,25	Loja de materiais de construção(MaxMatt)
Placa de acrílico cristal 2100 × 1200 × 5mm	1	9031051	28,82	www.plasticos-do-sado.pt
Resistência bobinada de 5 Ω	1	151-631	0,40	www.rsportugal.com

Cola para poliestireno -Pattex Extreme Pro	1		7,45	Loja de Bricolage
Alvéolo de painel vermelho	1	433-3326	0,62	www.rsportugal.com
Alvéolo de painel preto	1	433-3332	0,62	www.rsportugal.com
Pés adesivos(8 unid.)	1		2,95	Loja de Bricolage
Massa de 1kg	Construído com um cilindro de latão ao qual se aparafusa um gancho			

Calorímetro com resistência acoplada

- Corte duas placas, uma de 100×100 mm e outra de 60×60 mm, de espuma rígida poliestireno.
- Na placa de 60×60 mm “abra” um quadrado de 25×25 mm.
- Cole as duas placas.
- Corte duas placas de acrílico, uma de 100×100 mm e outra 90×60 mm.
- À maior cole quatro pés adesivos.
- Na menor, faça dois furos para encaixar os alvéolos de ligação e outro furo para entrada do termómetro.
- Faça a ligações dos alvéolos com a resistência¹⁴, conforme mostra a Figura 8-4

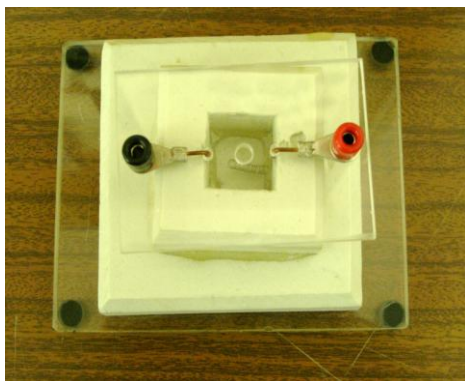


Figura 8-4 Calorímetro com resistência

¹⁴ A resistência também pode ser construída enrolando cerca de 14 cm de fio de cromo-níquel de diâmetro 0,2mm.

Carro movido a água quente



Figura 8-5 Carrinho e comando

Material necessário

Designação	Quant.	Código	Preço unidade/€	Fornecedor
Refrigerador termoelétrico, 33.4W 30 × 30 mm	2	238-2988	37,15	www.rsportugal.com
Dissipador de calor (pin 12 × 14 mm)	2	821-813	4,56	www.rsportugal.com
Adesivo para dissipador (20mL)	1	850-984	25,83	www.rsportugal.com
Chapas de alumínio 55 × 55 mm Placa 210 × 297 × 1,5 mm	1	456-1307	36,21	www.rsportugal.com
Espuma rígida poliestireno extrudido (XPS) Wallmate 30mm Placa 2600 × 660 × 30 mm	1		6,25	Loja de materiais de construção(MaxMatt)
Carrinho de brinquedo com comando à distância e de baixa tensão (Max.3V)	1		5,00	Loja de Brinquedos
Fios elétrico isolado vermelho 0,5m	1	488-286	2,74	www.rsportugal.com
Fios elétrico isolado preto 0,5m	1	488-270	2,74	www.rsportugal.com
Cola para poliestireno Pattex Extreme Pro)	1		7,45	Loja de Bricolage
Placa de contraplacado 1250 × 625 × 4 mm	1		6,45	Loja de Bricolage
Pega de metal	1		2,0 a 3,0	Loja de Bricolage
Fita de velcro	0,5m		4,00	Loja de Bricolage

-Corte as placas de poliestireno: quatro de 60 × 110 mm, uma de 60 × 79 mm e duas de 41 × 60 mm., sendo a espessura aconselhada de 10mm.

-Em duas das placas de 60 × 110 mm abra uma janela de 45 × 45 mm.

-Cole as chapas de alumínio nas janelas.

-Construa o reservatório para a água com as quatro placas ao alto e a placa de 60 × 79mm como base.

-Cole (com “adesivo para dissipador”) as células de Peltier às chapas de alumínio. Atenção à polaridade da célula, esta deverá ser colada de forma a que o fio vermelho se encontre do lado esquerdo e o preto do lado direito.

-A cada célula cole um dissipador.

-Ligue (soldando os fios) as células em paralelo.

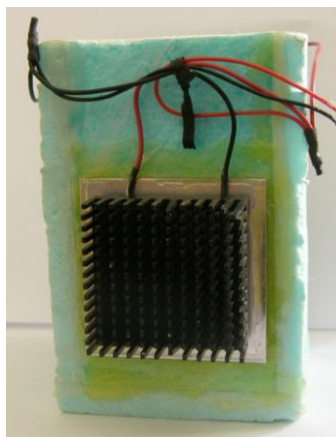


Figura 8-6 reservatório com célula e dissipador

-Faça a ligação das células ao comando do carrinho soldando os terminais de dois fios eléctricos isolados ao conjunto das células e ao terminal do porta-pilhas.

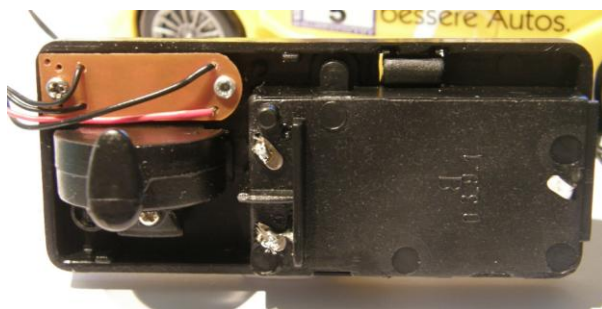
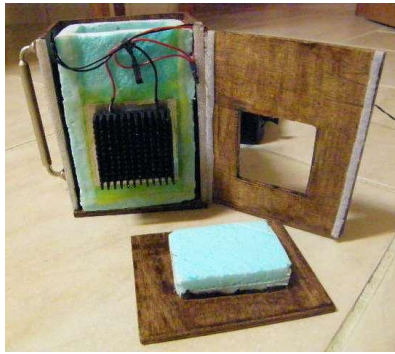


Figura 8-7 Pormenor da ligação das células (a vermelho e preto) e do carrinho (a preto) ao comando

-Faça a ligação do comando ao carrinho utilizando os próprios fios do carrinho.

-Construa, em madeira, uma caixa para o reservatório. Numa lateral aparafuse uma pega. A parte frontal deve ser unida à restante caixa com tira de velcro de forma a ser fácil a sua abertura.

-Cole as placas de 41 × 60 mm a uma placa de madeira de forma a fazer uma tampa.



**Figura 8-8 Caixa de madeira para
o reservatório de água**

-Aplique uma tira de velcro na outra lateral da caixa e no comando para o acoplar à caixa de madeira.

-Dependendo do tipo de carro a trajectória pode ser forçada a circular. Se este tiver uma roda de direcção pode – se fixar esta roda diagonalmente de forma que o carro descreva uma trajectória circular em torno do reservatório.

Kit termoeléctrico

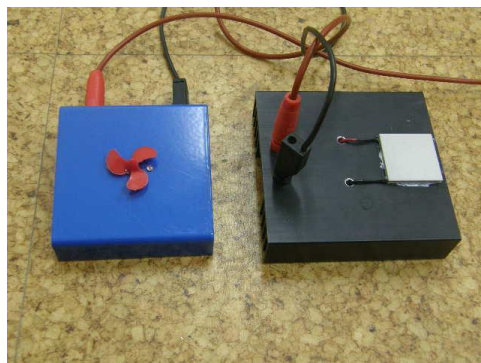


Figura 8-9 Kit Termoeléctrico

Material necessário

Designação	Quant.	Código	Preço unidade/€	Fornecedor
Refrigerador termoeléctrico, 33.4W, 30 × 30 mm	2	238-2988	37.15	www.rsportugal.com
Dissipador de calor	1	507-4999	4.87	www.rsportugal.com
Adesivo para dissipador (20 mL)	1	850-984	25.83	www.rsportugal.com
Módulo com motor	1	15822	18,75	Redidáctica
Pilha de 4,5 V	1	221-181	0,97	www.rsportugal.com
Alvéolo de painel vermelho	1	433-3326	0,62	www.rsportugal.com
Alvéolo de painel preto	1	433-3332	0,62	www.rsportugal.com
Cabo eléctrico vermelho 0,5m	1	488-286	2,74	www.rsportugal.com
Cabos eléctricos preto, 0,5m	1	488-270	2,74	www.rsportugal.com

-Fure o dissipador de calor.

-Cole a célula de Peltier ao dissipador, com a face quente para cima, conforme mostra a Figura 8-10 e ligue-o electricamente aos alvéolos na extremidade oposta.

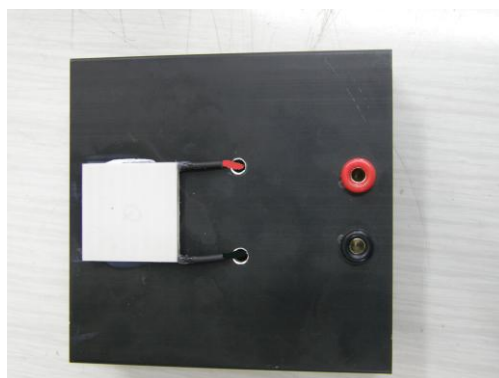


Figura 8-10 Dissipador com célula

Acessórios

Designação	Quant.	Código	Preço unidade/€	Fornecedor
Gobelé 100 mL	1	23880	2,20	Redidáctica
Termómetro digital	1	268-2367	35,13	www.rsportugal.com
Folha de cortiça 1000 × 1000 × 3mm	1		5,95	Loja de materiais de construção(MaxMatt)

-Forre um copo de vidro (gobelé) com folha de cortiça.

-Fure uma rolha de borracha ou cortiça de forma a introduzir um termómetro digital.

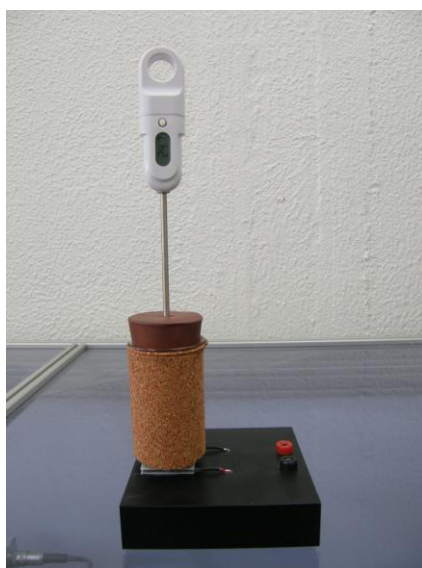


Figura 8-11 Módulo de Peltier com gobelé e termómetro

Endereços das empresas mencionadas no texto

Radipeças

R. José Afonso nº9-B- Laranjeiro Tel: 212588047 www.radipecas.com

Plásticos do Sado

Av. Das Forças Armadas, 51ª Lisboa Tel: 217818170 www.plasticos-do-sado-pt

Redidáctica

R.Vieira da Silva nº13, Lj A Odivelas Tel:219329779

(representante da Ventus em Portugal www.ventusciencia.com)

Apêndice 2 – Estudo do rendimento de um motor com caixa redutora

Motor de 12 V CC com caixa redutora de 24,5:1

Referência RS 224-3647 190,19 €



Figura 8-12 Pormenor da caixa redutora

O motor utilizado tem uma caixa redutora de 24,5:1. Este tipo de motor possui um sistema de rodas dentadas que imprime uma maior rotatividade à saída.

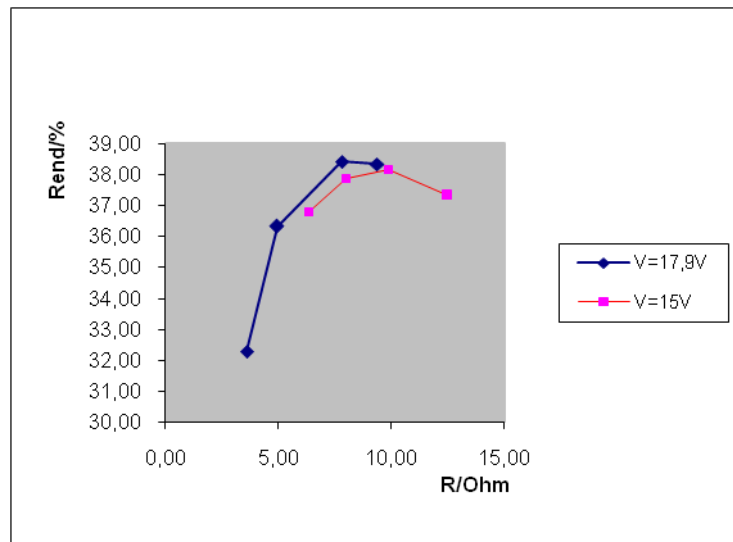
Neste caso, sendo usado como gerador, o sistema de rodas dentadas vai aumentar a rotatividade do motor fornecendo, assim, uma maior corrente eléctrica.

O estudo foi feito ligando o motor a uma fonte de alimentação com indicação digital da intensidade da corrente e da tensão. Fez-se, assim, o registo das medidas do motor em vazio. Numa segunda fase ligou-se o motor a outro motor (que funciona como gerador) e este a um reóstato. Introduziu-se na montagem um amperímetro e um voltímetro que medem, respectivamente, a intensidade de corrente e a tensão à saída do gerador.

Folha de Cálculo – Rendimento do motor

Motor em vazio			Motor em carga								
			Registos na FA			Registos à saída do gerador					
I/A	V/V	Pf(motor)/W	I/A	V/V	Pf(conj)/W	I/A	V/V	R/Ohm	Pf(gerador)/W	Putil(gerador)/W	η /%
0,30	8,90	2,67	1,50	9,00	13,50	0,49	6,20	12,65	10,83	3,04	28,05
0,30	8,90	2,67	1,70	9,00	15,30	0,64	5,90	9,22	12,63	3,78	29,90
0,30	8,90	2,67	2,00	9,00	18,00	0,80	5,50	6,88	15,33	4,40	28,70
0,30	8,90	2,67	2,35	9,00	21,15	1,06	5,00	4,72	18,48	5,30	28,68
0,30	8,90	2,67	2,85	9,00	25,65	1,42	4,20	2,96	22,98	5,96	25,95
0,36	11,90	4,28	1,80	11,90	21,42	0,69	8,50	12,32	17,14	5,87	34,23
0,36	11,90	4,28	1,90	11,90	22,61	0,75	8,35	11,13	18,33	6,26	34,17
0,36	11,90	4,28	2,10	11,90	24,99	0,89	8,00	8,99	20,71	7,12	34,39
0,36	11,90	4,28	2,25	11,90	26,78	1,10	7,82	7,11	22,49	8,60	38,25
0,36	11,90	4,28	2,50	11,90	29,75	1,19	7,50	6,30	25,47	8,93	35,05
0,36	11,90	4,28	2,74	11,90	32,61	1,34	7,30	5,45	28,32	9,78	34,54
0,36	11,90	4,28	3,06	11,90	36,41	1,60	6,68	4,18	32,13	10,69	33,26
0,36	11,90	4,28	3,55	11,90	42,25	1,92	6,10	3,18	37,96	11,71	30,85
0,36	15,00	5,40	2,09	15,00	31,35	0,88	11,00	12,50	25,95	9,68	37,30
0,36	15,00	5,40	2,37	15,00	35,55	1,08	10,65	9,86	30,15	11,50	38,15
0,36	15,00	5,40	2,70	15,00	40,50	1,29	10,30	7,98	35,10	13,29	37,85
0,36	15,00	5,40	3,05	15,00	45,75	1,53	9,70	6,34	40,35	14,84	36,78
0,35	17,90	6,27	2,90	18,00	52,20	1,37	12,85	9,38	45,94	17,60	38,32
0,35	17,90	6,27	3,20	18,00	57,60	1,59	12,40	7,80	51,34	19,72	38,41
0,35	17,90	6,27	4,10	18,00	73,80	2,23	11,00	4,93	67,54	24,53	36,32
0,35	17,90	6,27	4,88	18,00	87,84	2,70	9,75	3,61	81,58	26,33	32,27

O rendimento é maximizado por uma resistência de cerca de 8 Ohm, para uma tensão de 17,9V.



Apêndice 3- Estudo da plataforma

Numa tentativa de percorrer um largo espectro de alunos testou-se a plataforma com pessoas de massas 51,1 kg, 69,9 kg e 78,3 kg.

Os ensaios foram realizados utilizando, como resistência de aquecimento, duas resistências bobinadas de 59Ω ligadas em paralelo.

Para detectar pequenas variações de temperatura foi utilizado um termopar tipo K (referência 3971589 – RS).

O motor utilizado foi o descrito no Apêndice 2 – Estudo do rendimento de um motor com caixa redutora.

A resistência utilizada resultou de um compromisso entre o rendimento do motor e o aumento de temperatura da água.

Foram realizados testes com resistências de diferentes valores chegando-se à conclusão que o que serviria melhor os propósitos desta experiência era o de aproximadamente 30Ω . A utilização de duas resistências em paralelo deve-se unicamente à disponibilidade de material.

Neste estudo conclui-se que o rendimento diminui com o aumento da massa do corpo em queda. Quanto maior for o peso do experimentador maior é a tendência para um efeito rotativo da placa em relação ao seu ponto de suporte, conforme mostra a Figura 8-13.

Assim, é exercida uma força de atrito de torção na placa. Para anular esta força de atrito, a placa deveria deslizar ao longo das calhas pelo seu centro de gravidade e não por um dos extremos.

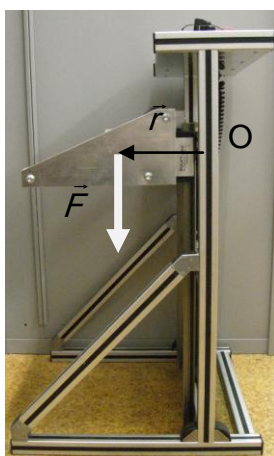


Figura 8-13 O momento da força \vec{F} , em relação a O , é: $\vec{M}_O(\vec{F}) = \vec{r} \times \vec{F}$

Folhas de cálculo – Rendimento da plataforma para diferentes massas.

$h =$	0,515 m
$m_{\text{corpo}} =$	51,1 kg
$m_{\text{água}} =$	7,4 g
$c_{\text{água}} =$	4180 Jkg ⁻¹ °C ⁻¹
$g =$	9,8 ms ⁻²

	1º ensaio	2º ensaio	3º ensaio
$\theta_{\text{inicial}}/^{\circ}\text{C}$	18,6	17,4	17,6
$\theta_{\text{final}}/^{\circ}\text{C}$	20,4	19,0	19,1
$\Delta\theta/^{\circ}\text{C}$	1,8	1,6	1,5
$\Delta\theta_{\text{médio}}/^{\circ}\text{C}$	1,6		

$$E_{\text{util}} = Q$$

$$Q = m_{\text{água}} c \Delta\theta$$

$$Q = 50,522267 \text{ J}$$

$$E_{\text{fornecida}} = E_{\text{pg}}$$

$$E_{\text{pg}} = m_{\text{corpo}} g h$$

$$E_{\text{pg}} = 257,9 \text{ J}$$

$$\eta = E_{\text{util}} / E_{\text{fornecida}}$$

$$\eta = 19,59 \%$$

Tendo em conta o atrito:

$$F_{\text{a}} = 78,4 \text{ N}$$

$$E_{\text{d}} = 40,376 \text{ N}$$

$$E_{\text{pg}} - E_{\text{d}} = 217,53 \text{ J}$$

$$\eta = 23,23 \%$$

$h =$	0,515 m
$m_{\text{corpo}} =$	69,9 kg
$m_{\text{água}} =$	7,4 g
$c_{\text{água}} =$	4180 Jkg ⁻¹ °C ⁻¹
$g =$	9,8 ms ⁻²

	1º ensaio	2º ensaio	3º ensaio
$\theta_{\text{inicial}}/^{\circ}\text{C}$	18,4	18,6	19,5
$\theta_{\text{final}}/^{\circ}\text{C}$	20,2	20,5	21,2
$\Delta\theta/^{\circ}\text{C}$	1,8	1,9	1,7
$\Delta\theta_{\text{médio}}/^{\circ}\text{C}$	1,8		

$$E_{\text{util}} = Q$$

$$Q = m_{\text{água}} c \Delta\theta$$

$$Q = 55,6776 \text{ J}$$

$$E_{\text{fornecida}} = E_{\text{pg}}$$

$$E_{\text{pg}} = m_{\text{corpo}} g h$$

$$E_{\text{pg}} = 352,8 \text{ J}$$

$$\eta = E_{\text{util}} / E_{\text{fornecida}}$$

$$\eta = 15,78 \%$$

Tendo em conta o atrito:

$$F_{\text{a}} = 78,4 \text{ N}$$

$$E_{\text{d}} = 40,376 \text{ N}$$

$$E_{\text{pg}} - E_{\text{d}} = 312,41 \text{ J}$$

$$\eta = 17,82 \%$$

$h=$	0,515 m
$m_{\text{corpo}}=$	78,3 kg
$m_{\text{água}}=$	7,4 g
$c_{\text{água}}=$	4180 Jkg ⁻¹ °C ⁻¹
$g=$	9,8 ms ⁻²

	1º ensaio	2º ensaio	3ºensaio
$\theta_{\text{inicial}}/^{\circ}\text{C}$	19,2	19,4	18,9
$\theta_{\text{final}}/^{\circ}\text{C}$	21	21,3	20,7
$\Delta\theta/^{\circ}\text{C}$	1,8	1,9	1,8
$\Delta\theta_{\text{médio}}/^{\circ}\text{C}$	1,8		

$$E_{\text{util}} = Q$$

$$Q = m_{\text{água}}c\Delta\theta$$

$$Q = 56,708667 \text{ J}$$

$$E_{\text{fornecida}} = E_{\text{pg}}$$

$$E_{\text{pg}} = m_{\text{corpo}}gh$$

$$E_{\text{pg}} = 395,2 \text{ J}$$

$$\eta = E_{\text{util}}/E_{\text{fornecida}}$$

$$\eta = 14,35 \%$$

Tendo em conta o atrito:

$$F_a = 78,4 \text{ N}$$

$$E_d = 40,376 \text{ N}$$

$$E_{\text{pg}} - E_d = 354,8 \text{ J}$$

$$\eta = 15,98 \%$$

Apêndice 4 – Estudo do Kit Termoelétrico – Rendimento no aquecimento

Folha de Cálculo – Rendimento no aquecimento

$$m_{\text{água}} = 30,0$$

t/s	V/V	I/A	$\theta/^{\circ}\text{C}$
0,00	4,9	0,83	23,3
32,37	4,8	0,83	24,0
50,63	4,7	0,83	24,8
63,42	4,9	0,84	25,2
86,89	4,9	0,84	25,7
104,90	4,9	0,83	26,1
127,48	4,8	0,83	26,5
146,01	4,9	0,83	26,9
167,18	4,8	0,84	27,2
185,74	4,9	0,83	27,5
202,91	4,9	0,83	28,2

$$P_u = m_{\text{água}} c \Delta\theta / \Delta t \quad P_u = 2,86$$

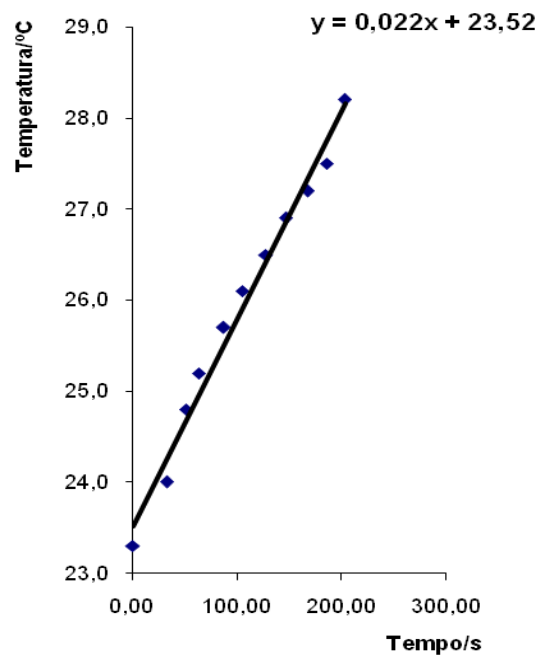
$$P_f = VI \quad P_f = 4,04$$

$$V_{\text{médio}} = 4,85$$

$$I_{\text{médio}} = 0,83$$

$$\Delta\theta / \Delta t = 0,0228$$

$$\eta = P_u / P_f \quad \eta = 0,707 \quad 70,7 \%$$

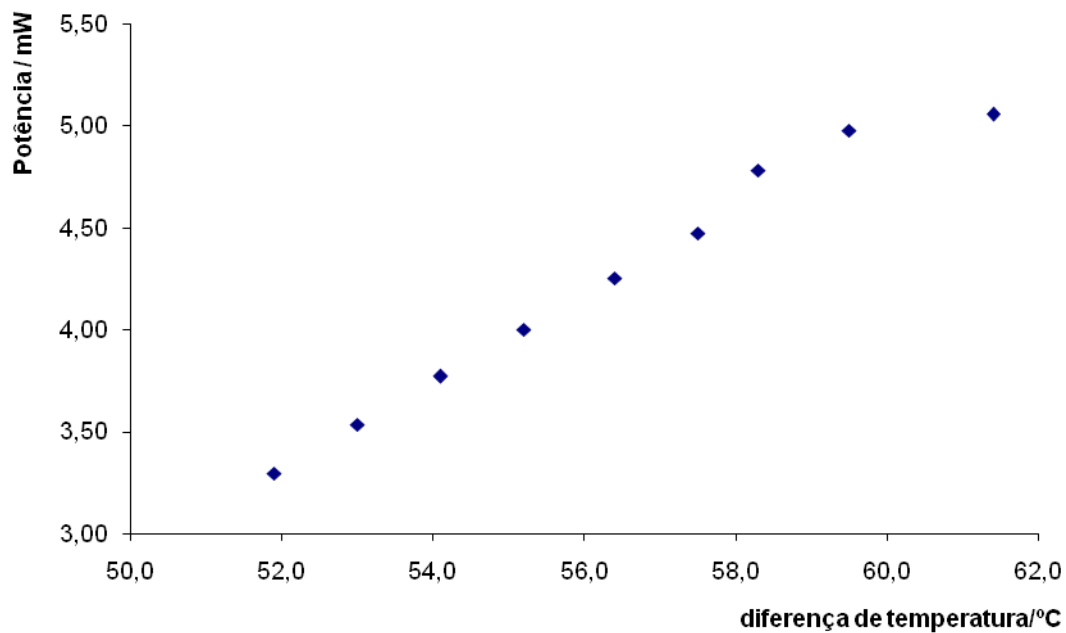


Apêndice 5 – Estudo do Kit Termoelétrico em modo gerador

Folha de Cálculo – Potência de uma célula de Peltier

$\theta_{\text{água}}/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{alumínio}}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta\theta/^{\circ}\text{C}$	V/V	I/mA	P/mW
76,5	15,1	61,4	0,488	10,36	5,06
74,9	15,4	59,5	0,478	10,41	4,98
73,9	15,6	58,3	0,458	10,44	4,78
73,4	15,9	57,5	0,435	10,28	4,47
72,5	16,1	56,4	0,409	10,40	4,25
71,5	16,3	55,2	0,385	10,39	4,00
70,6	16,5	54,1	0,366	10,30	3,77
69,7	16,7	53,0	0,345	10,25	3,54
68,8	16,9	51,9	0,323	10,20	3,29

$$P=VI$$



9 Anexos

Documentação relativa às Células de Peltier